



Aus dem Institut für Experimentelle Ophthalmologie  
der Medizinischen Fakultät  
der Universität des Saarlandes, Homburg/Saar  
Direktor: Prof. Dr. hum. biol. Achim Langenbacher

---

# Analyse und Optimierung von Schutzbrillen

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Naturwissenschaften  
der Medizinischen Fakultät  
der Universität des Saarlandes  
2013

vorgelegt von

**Benedikt Zelzer**

geb. am: 13.01.1987 in Neustadt an der Aisch

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Optische Grundlagen</b>	<b>8</b>
3.1	Die Optik des Auges . . . . .	8
3.2	Charakterisierung der optischen Abbildungsqualität . . . . .	9
3.3	Prismatische Wirkung und deren Kompensation . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Stand der Technik und Optimierungsansätze</b>	<b>15</b>
4.1	Schutzbrillenproduktion . . . . .	16
4.2	Aktuelle Prüfungsgrenzwerte und erweiterte Untersuchungen . . . .	19
<b>5</b>	<b>Simulationsplattform</b>	<b>20</b>
5.1	Schutzbrillenmodell . . . . .	20
5.2	Aufbau . . . . .	22
5.3	Simulation verschiedener Blickneigungen . . . . .	24
5.4	Validierung . . . . .	25
5.5	Schnittstelle zwischen dem Deflektometer und ASAP . . . . .	26
5.6	Zerlegung der Wellenfront in Zernikekomponenten . . . . .	27
5.7	Einlesen bereits vorhandener Modelle . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>28</b>
6.1	Analyse bestehender Optikdesigns . . . . .	28
6.2	Optimierte und neue optische Designs . . . . .	32
6.3	Einfluss der Pupillendistanz . . . . .	36
6.4	Einfluss der Beschichtung . . . . .	37
6.5	Einfluss des Rückflächenradius . . . . .	38
6.6	Optische Toleranzrechnung . . . . .	39
6.7	Prozessanalyse . . . . .	40

<b>7 Diskussion</b>	<b>45</b>
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>50</b>
<b>9 Literaturverzeichnis</b>	<b>52</b>
<b>10 Anhang</b>	<b>55</b>
<b>11 Eigene Publikationen</b>	<b>76</b>
<b>12 Danksagung</b>	<b>78</b>



# 1 Zusammenfassung

## Hintergrund und Ziele

Optische Verzerrungen in den Scheiben von Arbeitsschutzbrillen tragen zu einer verringerten Trageakzeptanz und einer dadurch erhöhten Unfallgefahr durch mechanische, optische, chemische, thermische und biologische Gefährdungen bei. Ziel dieser Dissertation war die Entwicklung einer Softwareplattform zur Analyse einzelner Prozessschritte in der Herstellung von Arbeitsschutzbrillen, welche im Rahmen des Projektes *Improved Vision for Occupational Eye Safety* bearbeitet wurden. Diese auf Basis der Software ASAP geschriebene Plattform ermöglichte die Prüfung, Analyse und Optimierung sowohl von theoretischen Optikdesigns, als auch von gemessenen Brillengeometrien.

## Methoden

Auf Basis der geltenden deutschen und europäischen Normen DIN EN 166/167 für Schutzbrillen, wurden Simulationsmodule zur Berechnung der prismatischen Wirkungsdifferenz, der sphärischen und der astigmatischen Wirkung implementiert und durch ein Modul zur Wellenfrontanalyse ergänzt. Der in der Norm ausschließlich betrachtete gerade Blick wurde um weitere vier Blickrichtungen unter jeweils  $20^\circ$  erweitert. Vermessene Oberflächen von Werkzeugen zur Herstellung von Schutzbrillen wurden in gleicher Weise analysiert.

## Ergebnisse

Mit Hilfe der Simulationsplattform wurden sechs Optikdesigns untersucht, weitere drei Optikdesigns erstellt und drei vermessene Schutzbrillen optimiert. Die Auswertungen eines variablen Schutzbrillenmodells zeigten charakteristische Abhängigkeiten zwischen geometrischen Veränderungen und der optischen Qualität. Pupillendistanzabweichungen von 4 mm um den Mittelwert von 63,5 mm führten zu Abweichungen der optischen Größen (sphärische, astigmatische und prismatische

Wirkung) von bis zu 12%, besonders bei stark gekrümmten Scheiben. Der Einfluss von simulierten homogenen Beschichtungen im Bereich von 20  $\mu\text{m}$  Schichtdicke lag bei bis zu 2,1%. Die Refraktion aller untersuchten Designs bei nasaler Blickrichtung war erhöht – bei vier von sechs Designs um über 90% im Vergleich zum geraden Blick. Die Betrachtung optischer Veränderungen bei Parameterschwankungen durch Fertigungstoleranzen zeigte die Robustheit von sechs untersuchten Designs, wobei alle Schutzbrillenmodelle noch innerhalb der Güteklasse 1 waren. Eine Prozessanalyse anhand eines Optikdesigns zeigte Änderungen der optischen Qualität nach einzelnen Prozessschritten auf. Der Unterschied in der sphärischen Wirkung zwischen Optikdesign und Werkzeug lag bei  $0,034\text{ m}^{-1}$  (astigmatische Wirkung  $0,026\text{ m}^{-1}$ ) und zwischen Werkzeug und Spritzgussrohling bei  $0,005\text{ m}^{-1}$  (astigmatische Wirkung  $0,093\text{ m}^{-1}$ ).

## Schlussfolgerungen

Durch die Erkenntnisse verschiedener untersuchter Schutzbrillen ist es künftig möglich, robustere Optikdesigns zu erstellen. Die geringe optische Qualität einzelner Schutzbrillenmodelle konnte unter Beibehaltung der Schutzbrillendicke erkannt, analysiert und optimiert werden. Die Untersuchung verschiedener Blickrichtungen zeigte, dass Inklinationen des Auges von 20% teils starken Einfluss auf die optische Qualität haben. So sollte sich nicht nur nach den Normen gerichtet werden, die Grenzwerte für den geraden Blick vorgeben. Robustere Optikdesigns und damit eine geringere Änderung der Brechwerte bei verschiedenen Durchblicksneigungen und Pupillendistanzen wären das Ziel. Somit stellt die entwickelte Softwareplattform eine zusätzliche Analysemöglichkeit zur bisherigen Vermessung der Schutzbrillen auf einer optischen Messbank dar und soll zur Erhöhung der Trageakzeptanz und somit zur Reduzierung der Unfallgefahr beitragen.

# Summary – Analysis and optimization of safety eyewear

## Background and purpose

Optical aberrations of safety eyewear are one reason of reduced wearer acceptance and therefore increasing the risk of accidents, due to mechanical, optical, chemical, thermic and biologic hazards. The aim of this study was to develop a software platform for analyzing individually process steps in the production sequence, which was part of the project *Improved Vision for Occupational Eye Safety*. This software platform, based on the raytracer ASAP, could be used to analyze and optimize both theoretical optic designs and measured safety eyewear.

## Methods

Different modules to simulate the spherical power, astigmatic power and prism imbalance, based on the current german and european standards DIN EN 166/167 for protectional eyewear, were implemented and completed by a wavefront module. The evaluation of the straight view, defined by those standards, was enhanced by four viewing directions with inclinations of 20° each. Measured surfaces of tools for producing eyewear were analyzed in the same manner.

## Results

Using the software platform six optic designs were analyzed, another three optic designs were generated und three measured safety spectacles were optimized. The results of the safety spectacle model showed characteristic relations between geometric changes and optical quality. Changes in pupil distances of 4 mm around the mean value of 63.5 mm induced optical changes (spherical power, astigmatic power and prism imbalance) up to 12%, especially in the case of spectacles with higher ra-

dii of curvature. The simulated influence of homogeneous coatings with a thickness of 20  $\mu\text{m}$  was up to 2.1%. The refraction of all simulated optic designs in the nasal viewing direction was higher in comparison to the straight line of view – in the case of four out of six optic designs up to 90% higher. Changes in model parameter, due to changes in tool quality, showed the robustness of six designs, whereby all designs remained within the best optical class 1. The process chain analysis, based on one optic design, showed optical changes after different process steps. The difference in spherical power between optic design and tool was  $0.034 \text{ m}^{-1}$  (astigmatic power  $0.026 \text{ m}^{-1}$ ), between tool and blank  $0.005 \text{ m}^{-1}$  (astigmatic power  $0.093 \text{ m}^{-1}$ ).

## Conclusions

By using the optical results of different simulated designs it was possible to generate better (high robustness, low optical aberrations) optic designs. It was possible to improve the optical quality of measured and analyzed safety spectacles, by keeping the spectacle thickness. Different vertical angles of gaze showed a high impact of up to 20% on the optical quality. I suggest to expand the standards, which only define limits for the straight view, by implementing also different viewing directions. Robust optic designs and therefore only small refractive changes by different gaze angles and pupil distances would be the aim. Thus, this developed software platform is a tool for analyzing spectacles in addition to still existing benchmarks and should increase the wearer acceptance to decrease the risk of accidents.

## 2 Einleitung

Die aktuell geltende berufsgenossenschaftliche Verordnung (Benutzung von Augen und Gesichtsschutz) legt fest, dass Arbeiten oder Tätigkeiten im potentiellen Gefahrenbereich chemischer Substanzen oder im Bereich, in dem die Möglichkeit einer mechanischen oder thermischen Verletzung vorliegt, mit einem adäquaten Augenschutz durchgeführt werden müssen [4, 18]. Dass dies in der Praxis nicht immer umgesetzt wird, belegen aktuelle Unfallstatistiken. Der Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften HVBG meldet jährlich über 36.000 Augenverletzungen. Der Anteil von Augenschädigungen bei Kopfverletzungen liegt bei ca. 75% [15]. Wird der private Bereich mit eingeschlossen, steigt die Zahl der Augenverletzungen pro Jahr auf rund 300.000 [15]. Dabei reichen die Verletzungen von leichten Kratzspuren auf der Hornhaut über Netzhautschädigungen durch energiereiche Strahlung bis hin zu Schädigung des kompletten Augapfels aufgrund einer penetrierenden oder perforierenden Verletzung oder einer Berstung des Augapfels.



Abbildung 2.1: Mögliche Augenverletzungen bei unzureichendem Augenschutz. A: Schädigung der Hornhaut durch Kratzer [16]. B: Netzhautschädigung durch Laserstrahlung [31]. C: Perforation des Augapfels durch Eindringen von Fremdkörpern [14].

Ein adäquater Augenschutz wird neben Schildern und Visieren insbesondere durch Schutzbrillen realisiert. Sie finden hauptsächlich im Arbeits- sowie im Sportumfeld Verwendung und schützen vor mechanischen, optischen, chemischen, thermischen und biologischen Gefährdungen [4].

Trotz des inzwischen erhöhten Tragekomforts durch moderne Herstellungsverfahren, wie dem Zweikomponentenspritzguss in Verbindung mit neuen Werkstoffen,

durch Oberflächenbeschichtungen (hardcoating oder anti-fog) oder der Tragepflicht von bereitgestellten Schutzbrillen in Unternehmen, wird eine Schutzbrille oft nicht akzeptiert [21]. Denn bisher konzentrierte sich die Weiterentwicklung von Schutzbrillen im Wesentlichen auf eine Erhöhung der Schutzwirkung und weniger auf die optische Wirkung auf das Auge, die im besten Fall frei von optischen Verzerrungen ist, also eine Schutzbrille mit refraktiver Nullwirkung. Durch Einschränkungen im Sichtfeld oder optische Verzerrungen der Scheibe wird die Sicht durch die Schutzbrille insofern beeinflusst, dass Konzentrationsverlust, Spannungskopfschmerz und Ermüdungserscheinungen auftreten können und die Tätigkeit nicht zufriedenstellend ausgeführt werden kann. So klagten nach einer Studie von Lombardi et al. 30% der befragten Träger von Schutzbrillen über Kopfschmerz und Schwindel aufgrund visueller Beeinträchtigung [21]. Es wird so nicht selten auf eigene Gefahr auf einen Augenschutz komplett verzichtet, wenn die Qualität der Arbeit durch das Tragen der Brille, speziell optische Verzerrungen, beeinträchtigt ist [18]. So sorgen z.B. Abbildungsfehler aufgrund einer prismatischen Wirkung für eine Fehlstellung beider Augen zueinander, was im Laufe der Zeit zu einem verminderten Tragekomfort beiträgt. Weiter sorgen neben Fehlern wie Defokus und Astigmatismus speziell Abbildungsfehler höherer Ordnung wie Koma, Dreiblattfehler oder sphärische Aberration für eine eingeschränkte optische Qualität, obwohl objektive normative Prüfungen der optischen Qualität eingehalten werden und geltende Grenzwerte nicht überschritten werden.

Das primäre Ziel des bearbeiteten Projektes *Improved Vision for Occupational Eye Safety* war eine Steigerung der optischen Qualität von Arbeitsschutzbrillen. Die damit verknüpfte erhoffte Steigerung der Akzeptanz von Schutzbrillen soll zur Verminderung von Augenverletzungen beitragen.

Die Prozesskette zur Herstellung von Arbeitsschutzbrillen wurde in Zusammenarbeit mit der Hochschule Aalen und der Firma UVEX Arbeitsschutz GmbH (Fürth, Deutschland, im Folgendem mit UVEX abgekürzt) untersucht und verbessert. Wie in Abbildung 2.2 zu sehen ist, beinhaltet diese die Berechnung eines optischen Designs, die Erstellung von Werkzeugen für den Spritzguss (Spiegeleinsätze), den Spritzguss der Scheibe, die Beschichtung und die Assemblierung der Scheiben in die Fassung.

Zu Beginn des Projektes waren zu wenig Informationen über die einzelnen Prozessschritte bekannt, da die Zwischenprodukte der in Abbildung 2.2 aufgelisteten Prozesskette nicht vermessen werden konnten. Die notwendigen Anpassungen von Optikdesign und Werkzeugen wurden durch externe Firmen durchgeführt. Durch diese

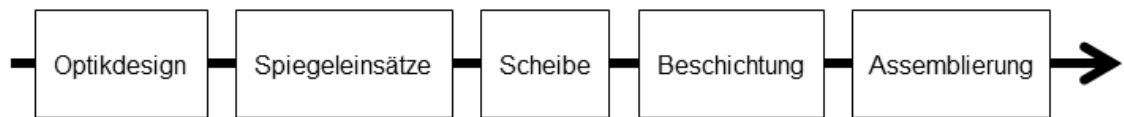


Abbildung 2.2: Prozesskette inklusive der fünf Prozessschritte zur Herstellung von Arbeitsschutzbrillen.

extern erbrachten Schlüsselkompetenzen waren nur unzureichende Optikkenntnisse zur Erstellung von Designs und keine Politurkenntnisse zur Feinbearbeitung der Spiegeleinsätze vorhanden. Die extern erbrachten Leistungen konnten nicht oder nur unzureichend überprüft werden. So war unklar ob die Optikdesigns und die Spiegeleinsätze mit den Forderungen überein stimmten.

Die optische Qualität im Schutzbrillenprozess konnte erst am Prozessende anhand der fertigen Schutzbrille überprüft werden. Erst nach dem Spritzguss der ersten Scheiben und einem stabilen Prozess konnte die optische Qualität beurteilt werden. Rückschlüsse auf einzelne Prozessschritte konnten nicht gezogen werden.

Künftig sollen verwendete Designs in Bezug auf die Abbildungsqualität charakterisierbar sein, den normativen Anforderungen gerecht werden und unter verschiedenen Blickrichtungen optimale Eigenschaften erreichen. Das Verbesserungspotential soll unter Beibehaltung der Schutzwirkung anhand der Analyse der Modellparameter und deren Einfluss auf die optische Qualität und durch Finden einer Optimierungsstrategie für bestehende oder neue Designs aufgezeigt werden. Die optischen Abweichungen von der geforderten optischen Wirkung nach jedem Prozessschritt sollen durch die Erfassung und Analyse von Abbildungsfehlern und die Bewertung des Einflusses dieser Abbildungsfehler erfolgen.

Auf Basis dieser Fragestellungen wurde zur Untersuchung von charakteristischen Einflussgrößen eine Softwareplattform entwickelt. Wichtige optische Grundlagen für die Simulation werden in nachfolgendem Kapitel näher betrachtet.

## 3 Optische Grundlagen

In diesem Kapitel werden neben der Optik des Auges die theoretischen Grundlagen zur Generierung neuer Brillendesigns beschrieben. Weiterhin wird eine Charakterisierung der optischen Qualität der Schutzbrille durch Zernike- und Refraktionsdaten erläutert.

### 3.1 Die Optik des Auges

Wichtige geometrische Eigenschaften des Auges in Bezug auf die Schutzbrille sind das Rotationszentrum des Augapfels, die Lage der Pupille, die Pupillendistanz und die maximale Blickneigung. Zur Simulation von Blickrichtungen, die vom geraden Blick abweichen, ist es wichtig, die Lage des Rotationszentrums des Auges zu kennen. Im Auge sind sechs am Auge anliegende Muskeln für die Ausrichtung zuständig. Aufgrund des komplizierten Aufbaus des Auges gibt es kein eindeutiges Rotationszentrum. Jedoch kann eine gemittelte Position angenommen werden. Nach einer Studie von Fry und Hill liegt das Rotationszentrum ca. 15 mm hinter der Hornhaut [13]. Es wird ebenfalls angenommen dass sich das Rotationszentrum auf der Sehachse des Auges befindet [27].

Um die Ergebnisse – insbesondere Wellenfrontanalysen – anderer wissenschaftlicher Arbeiten und der vorliegenden Arbeit vergleichbar zu machen, wurde ein Standard zur Messung und Simulation beachtet. Dieser sieht vor, dass das Zentrum der aufgezeichneten Wellenfront mit der Lage der Eintrittspupille – 3,8 mm hinter der Hornhautoberfläche – des Auges übereinstimmt [2, 27].

Entscheidend für den Durchblickpunkt einer Schutzbrille ist der Abstand beider Augen (genauer Pupillenmittelpunkte) zueinander, die sogenannte Pupillendistanz. Unterschieden wird hier zwischen der Messung beim Blick in die Ferne (far interpupillary distance FIPD) und der Messung bei Fokussierung auf ein nahe liegendes Objekt (near interpupillary distance NIPD). Die bei der Simulation verwendete FIPD wurde auf 64 mm festgelegt [9].



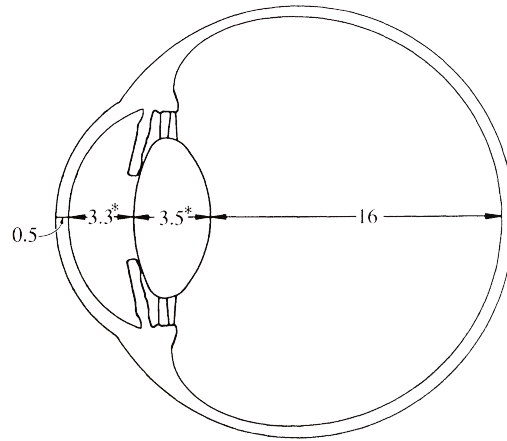


Abbildung 3.1: Dimensionen [mm] des relaxten menschlichen Auges. Die mit einem Stern versehenen Werte (Vorderkammertiefe und Linsendicke) variieren bei der Akkommodation des Auges.

Mit einer maximalen Blickneigung von  $20^\circ$  in jede Raumrichtung (oben, nasal, unten und temporal) ist auch der schräge Durchblick durch eine Schutzbrille relevant. Dieser Wert stellt die maximale Blickneigung des Auges dar bevor der Kopf nachgeführt wird [23]. Die DIN 33408:1987 sieht eine maximale Blickneigung von  $15^\circ$  vor.

## 3.2 Charakterisierung der optischen Abbildungsqualität

Eine Schlüsselposition in der Analyse und Optimierung von optischen Systemen stellt die Bestimmung der optischen Abbildungsqualität dar. So führen Abbildungsfehler (Aberrationen) zu einer ungewollten Beeinflussung des optischen Bildes durch die Schutzbrille. Neben materialbedingten chromatischen Abbildungsfehlern (Farblängsfehler und Farbvergrößerungsfehler) sind unter der Annahme eines rotationssymmetrischen optischen Systems nach Seidel in dritter Ordnung weitere fünf Abbildungsfehler beschrieben. Die Seidelschen Abbildungsfehler sind: Verzeichnung, Bildfeldwölbung, Koma, Öffnungsfehler und Astigmatismus [22].

Dabei sind die einzelnen Abbildungsfehler in der Praxis von unterschiedlicher Bedeutung [8]. So spielen die chromatischen Fehler von Schutzbrillen aufgrund der geringen Dicke und der deutlich dominanteren Abbildungsfehler des dioptrischen Apparates des Auges eine untergeordnete Rolle. Eine Verzeichnung kann visuell erkannt werden, wird jedoch durch das menschliche Wahrnehmungssystem (neuronale

Verarbeitung) nach einiger Zeit ausgeglichen. Die Verzeichnung komplett zu korrigieren würde zu stark durchgebogenen Scheiben führen. Die Bildfeldwölbung ist praktisch ebenfalls nicht korrigierbar, ist aber bei vermindertem Refraktionsfehler näherungsweise behoben [8]. Der Einfluss der Koma ist vernachlässigbar klein, da das Auge ansich bereits mehr Koma und sphärische Aberration besitzt [8]. Praktisch relevant, wenn auch nicht komplett korrigierbar, sind der Astigmatismus und der mittlere Refraktionsfehler (mittlere tangentielle und sagittale Brechkraft; auch sphärisches Äquivalent genannt).

Neben zahlreichen Varianten der Bestimmung der optischen Abbildungsqualität (Interferometrie, Shack–Hartmann Aberrometrie, uvw.) gibt es die Möglichkeit, mittels Strahlberechnungsprogrammen (Raytracer) die Änderung einer Wellenfront beim Durchdringen der Schutzbrille zu betrachten. Die Wellenfrontabweichung gibt nur monochromatische Bildfehler wieder. Aufgrund der Geometrie und des Brechungsindex der Brille ergeben sich beim Durchdringen der Wellenfront bei den einzelnen Strahlen unterschiedliche optische Weglängen, die in Form von Weglängendifferenzen (optical path length difference – OPD) aufgezeichnet werden (Abbildung 3.2). Im Idealfall sind alle Weglängen identisch und die Schutzbrille beeinflusst den Blick des Trägers nicht.

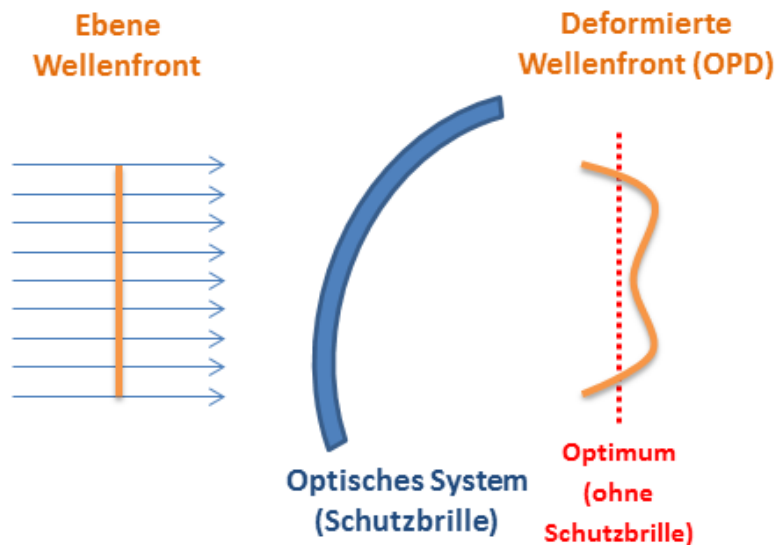


Abbildung 3.2: Beeinflussung der Wellenfront beim Durchdringen einer Schutzbrillenhälfte. Das theoretische Optimum: Die optische Weglänge ist für alle Strahlen identisch, die Wellenfront verändert sich nicht (rot gestrichelt).

Im Falle einer abbildungsfehlerbehafteten Brille muss nun die Wellenfrontabweichung untersucht werden. Mit einer geeigneten Darstellung der Wellenfront ist es

möglich, die Abbildungsqualität der Schutzbrille in Analogie zu den Refraktionsdaten einer Brille darzustellen, aber auch alle Fehler höherer Ordnung, wie Koma, Dreiblattfehler oder sphärische Aberration [28]. Die Wellenfront wird dazu in zueinander orthogonale Polynome (siehe Abbildung 3.3) zerlegt [12]. Eine weit verbreitete Variante für eine Zerlegung ist die sogenannten Zernikebasis. Damit ist es möglich jede beliebige Wellenfront als Linearkombination von Zernikepolynomen zu beschreiben. Üblicherweise gibt man nur die Polynombasis und die Koeffizienten an. In Tabelle 3.1 sind die verwendeten Polynome und deren Normalisierungsfaktor aufgeführt.

Tabelle 3.1: Zernikepolynome  $Z_0$  bis  $Z_4$  mit Normalisierungsfaktor in Polarkoordinaten.

Grad	Zernikepolynom	Norm. Faktor	Bezeichnung
$Z_0^0$	$= 1$	1	konstanter Term
$Z_1^1$	$= \rho \cos(\vartheta)$	2	Verkippung in x
$Z_1^{-1}$	$= \rho \sin(\vartheta)$	2	Verkippung in y
$Z_2^{-2}$	$= \rho^2 \cos(2\vartheta)$	$\sqrt{6}$	Astigmatismus $0^\circ$
$Z_2^0$	$= -1 + 2\rho^2$	$\sqrt{3}$	Defokus
$Z_2^2$	$= \rho^2 \sin(2\vartheta)$	$\sqrt{6}$	Astigmatismus $45^\circ$
$Z_3^{-3}$	$= \rho^3 \cos(3\vartheta)$	$\sqrt{8}$	Dreiblattfehler $0^\circ$
$Z_3^{-1}$	$= \rho(-2 + 3\rho^2) \cos(\vartheta)$	$\sqrt{8}$	Koma in x
$Z_3^1$	$= \rho(-2 + 3\rho^2) \sin(\vartheta)$	$\sqrt{8}$	Koma in y
$Z_3^3$	$= \rho^3 \sin(3\vartheta)$	$\sqrt{8}$	Dreiblattfehler $30^\circ$
$Z_4^{-4}$	$= \rho^4 \cos(4\vartheta)$	$\sqrt{10}$	Vierblattfehler $0^\circ$
$Z_4^{-2}$	$= \rho^2(-3 + 4\rho^2) \cos(2\vartheta)$	$\sqrt{10}$	Astigmatismus 2. Ordnung $0^\circ$
$Z_4^0$	$= 1 - 6\rho^2 + 6\rho^4$	$\sqrt{5}$	Sphärische Aberration 1. Ordnung
$Z_4^2$	$= \rho^2(-3 + 4\rho^2) \sin(2\vartheta)$	$\sqrt{10}$	Astigmatismus 2. Ordnung $45^\circ$
$Z_4^4$	$= \rho^4 \sin(4\vartheta)$	$\sqrt{10}$	Vierblattfehler $22,5^\circ$

Quelle: JC Wyant (1992) Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology [29].

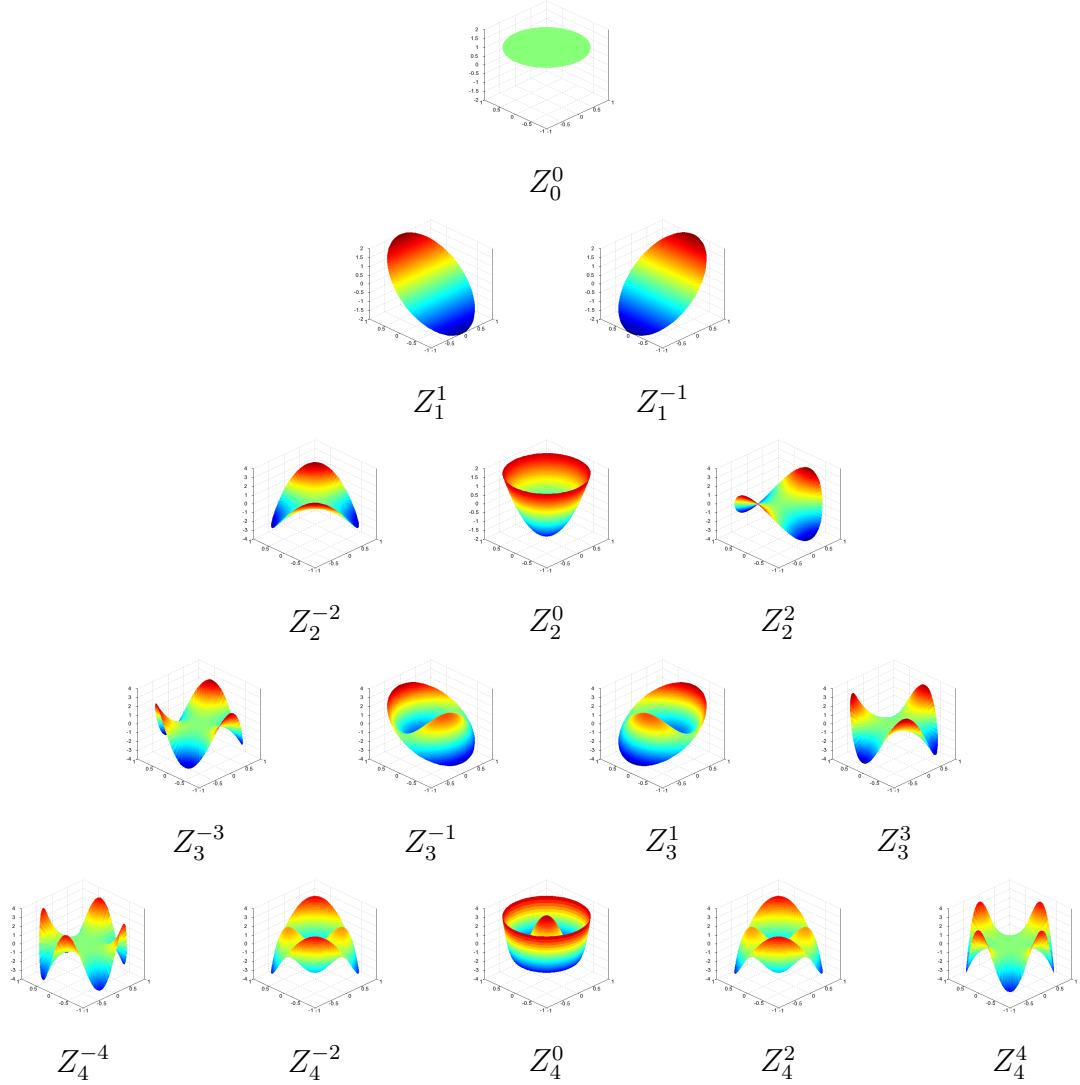


Abbildung 3.3: 3D-Darstellung der ersten 15 Zernikepolynome  $Z_0^0$  bis  $Z_4^4$  nach Ordnung sortiert. Darstellung durch  $Z_m^n$  (Ordnung, Winkelabhängigkeit).  $Z^0$  bis  $Z^2$  sind dabei Aberrationen niedriger Ordnung.

Quelle: Eppig T., Shack-Hartmann-Sensorik für die simultane Vermessung der Hornhaut-Oberfläche und der Abbildungsqualität des Auges [10].

Gemäß den Normen DIN EN 166/167:2001 sind die Grenzwerte in Refraktionsdaten Sphäre, Zylinder und Zylinderwinkel definiert. Hierzu werden die Koeffizienten der Zernikepolynome in Refraktionsdaten (Pluszylinder Schreibweise) mittels folgender Gleichungen umgerechnet [24]:

$$\Theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{Z_2^{-2}}{Z_2^2} \right) \mod 180^\circ, \quad (3.1)$$

$$\Phi_1 = - \left[ \frac{2\sqrt{6}}{r_{max}^2} (Z_2^{-2} \sin(2\Theta) + Z_2^2 \cos(2\Theta) + \frac{4\sqrt{3}}{r_{max}^2} Z_2^0) \right], \quad (3.2)$$

$$\Phi_2 = \left[ \frac{2\sqrt{6}}{r_{max}^2} (Z_2^{-2} \sin(2\Theta) + Z_2^2 \cos(2\Theta) - \frac{4\sqrt{3}}{r_{max}^2} Z_2^0) \right], \quad (3.3)$$

wobei  $\Phi_1$  die Sphäre *sph*,  $\Phi_2 - \Phi_1$  den Zylinder *zyl* und  $\Theta$  die Achse bezeichnet. Die normalisierten Zernikekoeffizienten sind in  $\mu\text{m}$  einzusetzen.  $r_{max}$  ist der Radius der Wellenfrontapertur in mm. Die Zernikepolynome sind innerhalb eines Einheitskreises mit Radius definiert.

Ergänzend wurden die Standardabweichung des gesamten Wellenfrontfehlers (root mean square – RMS) und der Abstand zwischen Maximal- und Minimalwert des Wellenfrontfehlers (peak to valley – PV) angegeben [24]:

$$\text{RMS}^2 = \frac{1}{A} \int \int_A (W - \bar{W})^2 dA \quad (3.4)$$

Wobei  $W - \bar{W}$  die Differenz zwischen einfallender und ausfallender Wellenfront ist und für den Wellenfrontfehler steht.  $A$  stellt die Fläche der Wellenfrontapertur dar.

### 3.3 Prismatische Wirkung und deren Kompensation

Fällt der Blick dezentriert und schräg durch das Brillenglas, entsteht durch ungleichmäßige Ablenkung der Strahlen eine prismatische Wirkung. Die Kompensation einer vorhandenen prismatischen Wirkung beim Tragen der Schutzbrille wird durch eine Drehbewegung (Stellbewegung) des Auges erreicht. Es wird nicht die Winkeländerung  $\delta$  selbst, sondern der Tangens des Winkels, d.h. der Weg der Ablenkung  $y$  in einer bestimmten Distanz  $z$  als Maß für die prismatische Wirkung angegeben [8].

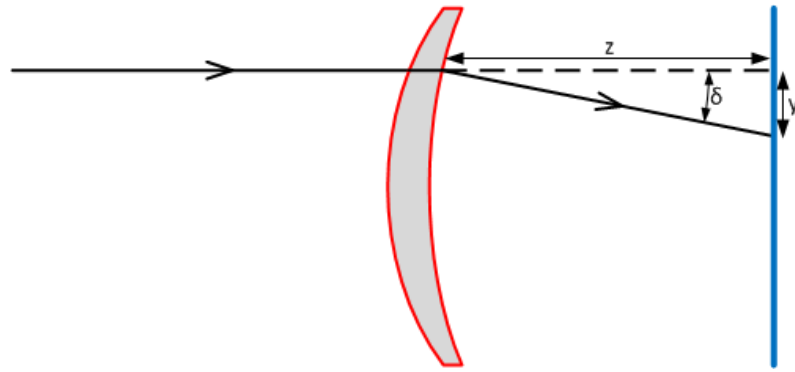


Abbildung 3.4: Definition der prismatischen Wirkung [8].

Die Angabe erfolgt in Prismen-Dioptrien entsprechend in cm (y) pro m (z). Da die Ablenkung eine betragsmäßige Größe ist, ist die Angabe der Basislage, also die Richtung der Ablenkung nötig. Beim binokularen Sehen wird der prismatische Einfluss einer Schutzbrille als prismatische vertikale bzw. horizontale Wirkungsdifferenz angegeben, welcher die prismatische Wirkung beider Brillenseiten (links / rechts) miteinbezieht. Beim Optikdesign kann der prismatischen Wirkung mit einer Verschiebung der Vorder- zur Rückfläche, also dem Hinzufügen eines Prismas mit entgegengesetzter Basislage, entgegengewirkt werden.

## 4 Stand der Technik und Optimierungsansätze

In diesem Kapitel wird zum einen der aktuelle Stand der Technik zur Herstellung von Schutzbrillen anhand der Prozesskette und zum anderen die, mit der Herstellung verbundene, qualitative messtechnische Beurteilung erläutert. Das Ziel ist eine erweiterte Messkette zur Untersuchung der Prozesseinflüsse (Abbildung 4.1). Gewonnene Erkenntnisse sollen anschließend in das Optikdesign überführt werden.

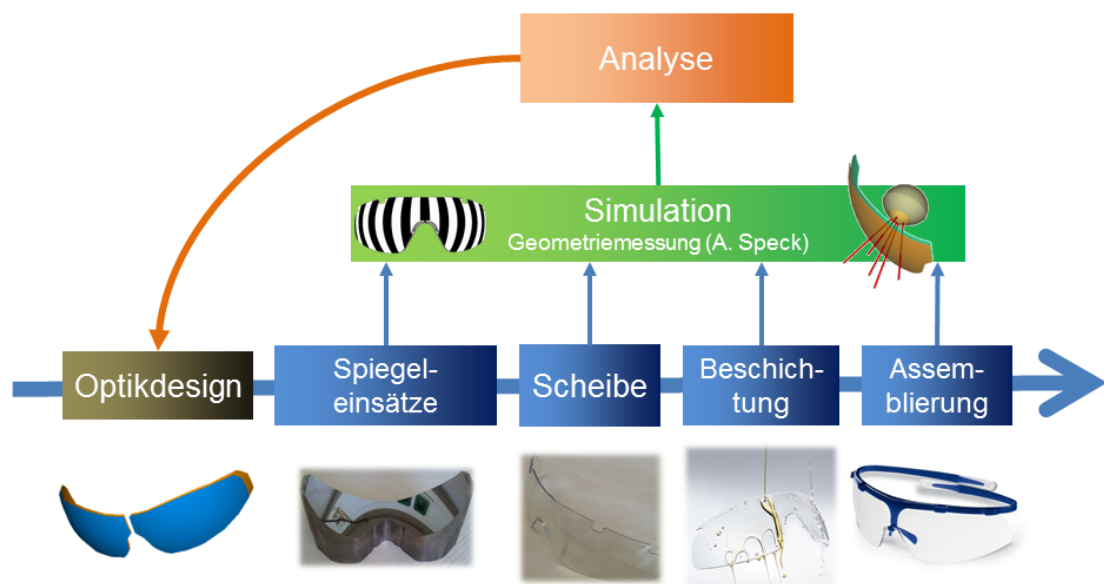


Abbildung 4.1: Erweiterte Prozesskette zur Herstellung von Schutzbrillen. Durch eine Simulation der einzelnen Prozessschritte kann deren Einfluss extrahiert werden. Gewonnene Erkenntnisse können in das Optikdesign zurückgeführt werden.

## 4.1 Schutzbrillenproduktion

Am Anfang steht das Optikdesign (Abbildung 4.2), welches optisch *neutral* sein sollte, d.h. theoretisch keine Abbildungsfehler induzieren sollte. Die Erstellung dieses Optikdesigns wurde seitens des Projektpartners bisher an einen externen Dienstleister vergeben. Probleme ergaben sich durch eine schlechte Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse (welche Zielgrößen wurden optimiert?) und geringe Flexibilität des Designs in Bezug auf Änderungen der optischen Qualität.

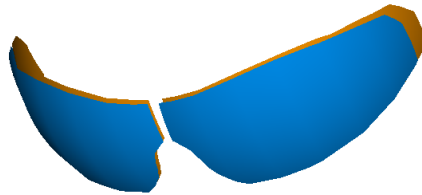


Abbildung 4.2: Visuelle Darstellung des Schutzbrillendesigns in ASAP.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methode zu Erstellung neuer optischer Designs in Abhängigkeit von Umgebungsparametern aufgezeigt.

Ein Zwischenschritt stellt das Einbetten des Optikdesigns in das Rahmendesign dar (Abbildung 4.3). Hier fließen Durchblicksneigung, Kopfbreite, Nasensteg und zusätzlicher Seitenschutz mit ein. Dieser Schritt wurde nicht näher untersucht, da er im Kompetenzbereich des Herstellers liegt.

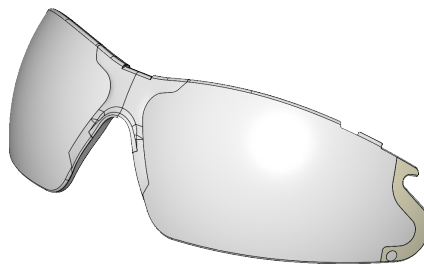


Abbildung 4.3: Einbetten des Optikdesigns in ein 3D Modell mit u.a. definierten Kanten, Aussparungen und Bügel.

Mit einem vollständigen 3D Modell der Brillenscheibe kann eine Form (Abbildung 4.4) für den Spritzguss hergestellt werden. Eine Form besteht dabei aus zwei spiegelnd polierten Metallschalen, den sogenannten Spiegeleinsätzen – einem konkaven und einem konvexen Einsatz. Auch dieser Schritt wurde bislang extern be-



arbeitet. Dabei existierte keine Formeingangsprüfung, die feststellte ob die Flächen denen des 3D Modells entsprechen.



Abbildung 4.4: Aus den 3D CAD Daten generierter Spiegeleinsatz (konkav) für den Spritzguss.

Ein Messsystem zur Vermessung von Spiegeleinsätzen wurde im Rahmen des Projektes von Alexis Speck aufgebaut [26]. Eine Analyse der Wechselwirkung beider Formflächen und deren Herstellungstoleranzen / –fehler miteinander, sowie der Vergleich zum Design wird in der vorliegenden Arbeit erläutert. Fehlerbehaftete Spiegeleinsätze werden so frühzeitig erkannt und können bereits vor dem Spritzguss nachgearbeitet werden.

Nach dem Spritzguss werden die Scheiben (Abbildung 4.5) bisher auf einer optischen Messbank auf Abbildungsfehler hin untersucht [7]. Diese Untersuchung charakterisiert die optischen Qualität der einzelnen Scheiben. Eine Bewertung erfolgt dabei subjektiv und unterscheidet sich je nach Messerfahrung des Prüfers.



Abbildung 4.5: Hergestellter Scheibenrohling.

Dieser Messschritt wurde durch Oberflächenvermessung der Scheiben durch Herrn Speck und die simulative Betrachtung in dieser Arbeit ergänzt. Gewonnene Mess-

daten wurden mit denen des Designs und der Spritzgussform verglichen. Zusätzlich wurde im Rahmen der Kooperation mit UVEX ein Wellenfrontmessplatz aufgebaut, mit welchen Betrachtungen in gleicher Weise wie der optischen Messbank möglich sind, wobei beim Wellenfrontmessplatz eine objektive Beurteilung anhand der Wellenfront durchgeführt wird [11].

Anschließend erfolgt die Innen- und Außenbeschichtung (Abbildung 4.6) für eine beschlag- und kratzfreie Schutzbrille. Die optische Messung wurde in Analogie zu unbeschichteten Scheiben durchgeführt. Der Einfluss der veränderten optischen Eigenschaften durch das Aufbringen einer Beschichtung wurde durch eine Simulation ergänzt. Dabei wurde der optische Einfluss einer variablen, aber homogenen Schichtdicke untersucht.

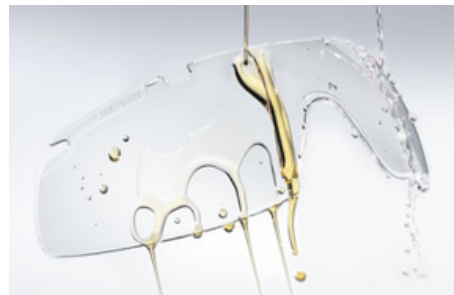


Abbildung 4.6: Beschichtung der Schutzbrille: Innenseite (beschlagsfrei) und Außenseite (kratzfest).

Den letzten Schritt stellt die Assemblierung der Scheibe in den Rahmen dar (Abbildung 4.7). Der Einfluss von starren Rahmen auf dünne Scheiben und der damit verbundenen Verbiegung kann ebenfalls vermessen und mit einer Simulation charakterisiert werden. Der Wellenfrontmessplatz besitzt bereits eine Möglichkeit der Änderung der Aufbiegung von Schutzbrillen – eine Messreihe hierzu ist geplant.



Abbildung 4.7: Montage der Scheibe im Rahmengestell.

## 4.2 Aktuelle Prüfungsgrenzwerte und erweiterte Untersuchungen

Für deutsche und europäische Schutzbrillenhersteller ist die Vermessung der optischen Qualität nach DIN EN 166/167:2001 vorgeschrieben. Neben den in DIN EN 167:2001 definierten Prüfverfahren sind in DIN EN 166:2001 die zulässigen Grenzwerte für getragene Brillen die beide Augen bedecken aufgeführt (Tabelle 4.1) [6, 7].

Tabelle 4.1: Zulässige Toleranzen für die Brechwerte von Schutzbrillen ohne Korrektionswirkung, die beide Augen bedecken.

Quelle: DIN EN 166:2001 [6].

Optische Klasse	sphärische Wirkung [m <sup>-1</sup> ]	astigmatische Wirkung [m <sup>-1</sup> ]	prismatische Wirkungsdifferenz [cm/m]		
			Horizontal Basis außen	Horizontal Basis innen	Vertikal
1	± 0,06	0,06	0,75	0,25	0,25
2	± 0,12	0,12	1,00	0,25	0,25
3	+ 0,12 -0,25	0,25	1,00	0,25	0,25

Die DIN EN 166/167:2001 sowie deren US amerikanisches Pendant ANSI Z87 basieren auf der internationalen Norm ISO 4849:1981 [1, 17]. Nach den deutschen Normen kann der Schutzbrille bei Einhaltung der Grenzwerte die jeweilige *optische Klasse* zugeordnet werden. Charakterisiert wird die Vermessung nach Norm durch:

- Messung der optischen Qualität beim geraden Durchblick
- Messung von Abbildungsfehlern niedriger Ordnung ( $Z^0$  bis  $Z^2$ )
- Messung bei fester Pupillendistanz und fester Kopfbreite
- Messung mit schmalbandigen Lichtquellen zur Verringerung der chromatischen Abbildungsfehler

## 5 Simulationsplattform

Analysen und Optimierungen der Schutzbrillen wurden mit einer Simulationsplattform in ASAP durchgeführt (Version 2010 V1R1 SP2, Breault Research Organisation, Tucson, USA) [30]. Dabei wurde darauf geachtet, die Simulation modular zu gestalten. Das Simulationsprinzip ist bei allen nachfolgend beschriebenen Modulen identisch (Abbildung 5.1):

1. Systemdefinition
2. Geometriedefinition
3. Definition der Quellen
4. Raytracing
5. Analyse

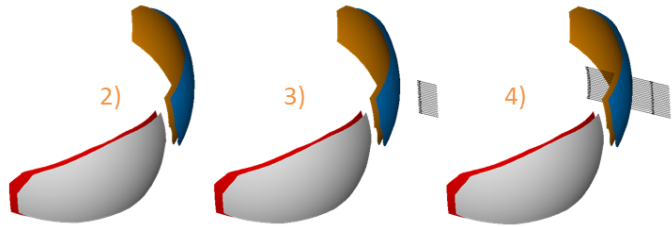


Abbildung 5.1: Aufbau der optischen Simulation.

### 5.1 Schutzbrillenmodell

Als Basis für die Simulation wurde ein variables Schutzbrillenmodell erstellt, welches neben den in Abbildung 5.2 gezeigten sphärischen Flächen durch asphärische Flächen beschrieben werden kann.

Die Beschreibung der optischen Flächen (Quellcode siehe Anhang A1 Abbildung 10.16) erfolgt neben der Krümmungsradien durch Angabe des Mittelpunktes, der durch den Offset in X-Richtung (Y-Richtung = 0) und die Differenz zwischen Vorder- und Rückflächenmittelpunkt definiert ist. Die absolute Position der Schutzbrille in Z-Richtung ergibt sich durch den Hornhautscheitelabstand (HSA) bei geradem Blick. Der HSA wurde für alle folgenden Simulationen auf 12,5 mm festgelegt (Definition seitens UVEX). Die Berechnung der Brillendicke unter dem Winkel  $\alpha$  erfolgte von (Punkt)  $P_2$  (Radienmittelpunkt der Rückfläche; eigene Definition) aus und in radialer Richtung. Der Detektor liegt in der Ebene der Iris,

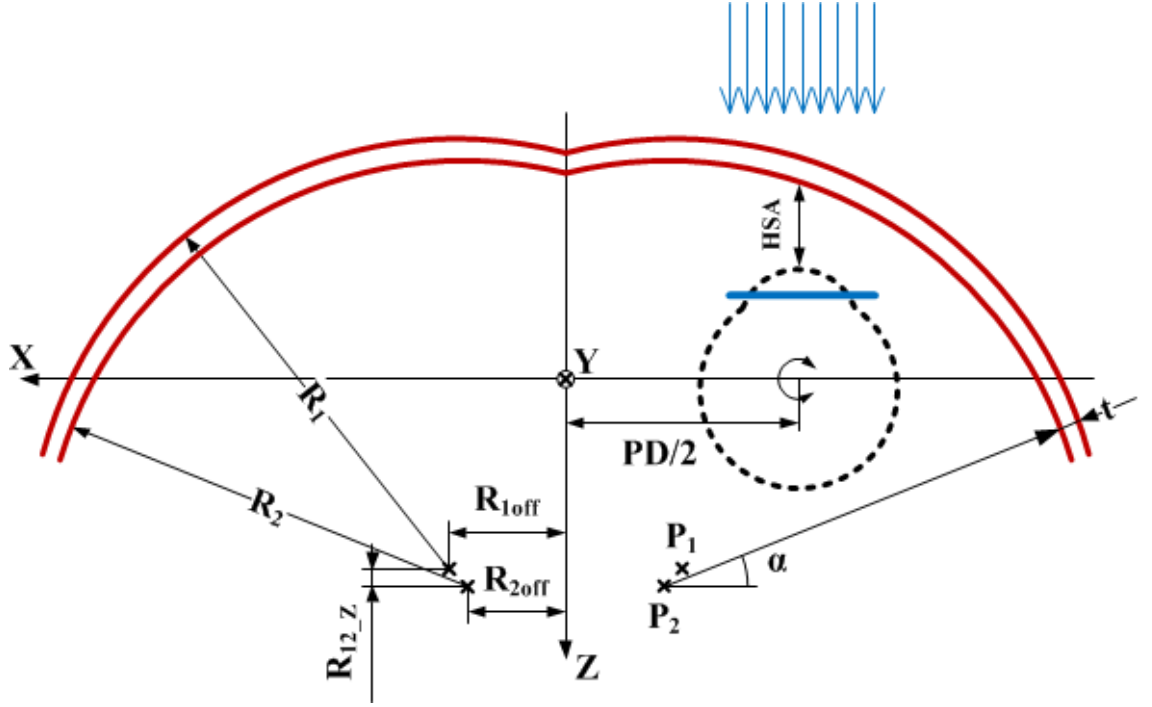


Abbildung 5.2: Querschnitt des symmetrischen Schutzbrillenmodells in der Ebene  $Y = 0$  von oben (rote Linie) welches für Simulationen herangezogen wurde. Auf der linken Seite sind die Parameter zur Definition der Geometrie und auf der rechten unteren Seite die Parameter zur Berechnung der Dicke gezeigt. Der Ort des rechten Auges ist schematisch eingezeichnet. Der Detektor (blaue Linie) liegt in der Ebene der Pupille und registriert die Wellenfront (Strahlenbündeldurchmesser 10 mm) und damit die optischen Abbildungsfehler. Das Rotationszentrum zur Simulation von verschiedenen Blickrichtungen wird durch einen gebogenen Pfeil angezeigt.

welche nach Atchison et al. 3,8 mm hinter der Hornhautvorderfläche liegt ( $Z = -11,2$  mm) [2]. Zusammen ergeben sich so 15 mm zwischen Hornhautvorderfläche und Rotationszentrum des Auges [13]. Der Brechungsindex von Polycarbonat liegt im sichtbaren Bereich zwischen  $n(\lambda = 380 \text{ nm}) = 1,62$  und  $n(\lambda = 780 \text{ nm}) = 1,57$  [5]. Für die Simulation wurde der Brechungsindex für unbeschichtetes Polycarbonat auf  $n(\lambda = 632,8 \text{ nm}) = 1,581$  (Makrolon<sup>®</sup>, Bayer) festgelegt [3]. Alle Simulationen wurden monochromatisch bei der Wellenlänge  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  durchgeführt. Dies ermöglicht den Vergleich mit einem im Institut aufgebauten Wellenfrontmessgerät [11]. Aus Gründen der Rechenzeit wurde die Spiegelsymmetrie der Scheibe genutzt und nur eine Seite analysiert.

## 5.2 Aufbau

Die Simulationsplattform wurde nach dem Schema untergliedert, welches in Abbildung 5.3 zu sehen ist (Code siehe Anhang A1, Abbildung 10.1 bis 10.6). Dabei wurde auf eine möglichst einfache Bedienung geachtet, die eine Fortführung der Entwicklungen auch nach Projektende erleichtert.

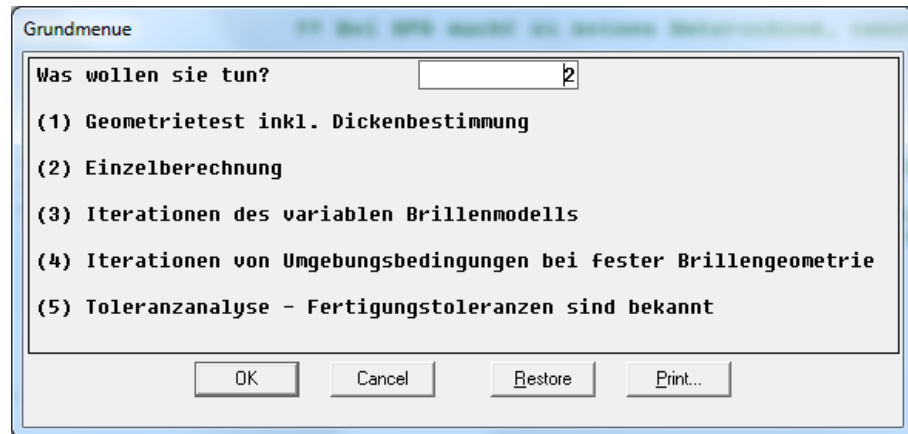


Abbildung 5.3: Steuerung der ASAP Simulationsplattform über Pop-up-Menüs, hier am Beispiel des Hauptfensters.

Neben der Anzeige einer bestimmten Schutzbrillengeometrie (Punkt 1) kann unter Punkt 2 ein definiertes Szenario simuliert werden. Soll der Einfluss bestimmter Parameter quantifiziert werden, ist dies bezüglich Veränderungen der Brillengeometrie unter Punkt 3 und bezüglich Veränderungen von Umgebungsparameter, wie z.B. Pupillendistanz (PD) oder HSA unter Punkt 4 möglich. Der letzte Punkt dient zur Bestimmung der optischen Toleranz/Schwankungen bei vorgegebenen Fertigungstoleranzen. Wobei sich Letztere über Fertigungs-, Positionierungs- und Spritzgussgenauigkeiten definieren. Die Basis bilden die Grundmodule zur Berechnung der prismatischen Wirkungsdivergenz, der sphärischen und astigmatischen Wirkung sowie der Wellenfront. Erstere drei Module wurden analog zu den geltenden deutschen Normen DIN EN 166/167:2001 aufgebaut, die Wellenfrontmessung ist in dieser Norm nicht abgebildet.

Der Programmcode des Moduls zur Berechnung der prismatischen Wirkungsdivergenz ist in Abbildung 5.4 dargestellt (Quellcode siehe Anhang A1 Abbildung 10.12 und 10.13). Die Strahlquelle ist durch zwei dünne divergierende Strahlbündel (Durchmesser 0,2 mm,  $\Phi = 0,9^\circ$ ) realisiert. Die Linse mit einer Brennweite von  $f' = 1000$  mm ist als ideale Linse definiert, bringt somit keine zusätzlichen Abbildungsfehler ein (ASAP Befehl *PERFECT*) und fokussiert beide Strahlbündel in die

Detektorebene. Durch die Integration eines optischen Systems – in diesem Falle eine Schutzbrille – werden die Strahlenbündel defokussiert. Das Maß der Defokussierung wird in Form des Abstandes beider Lichtpunkte zueinander in der Detektorebene abgelesen. Ein vorhandener prismatischer Effekt führt bei dem Träger der Schutzbrille zu einer Stellbewegung des Auges.

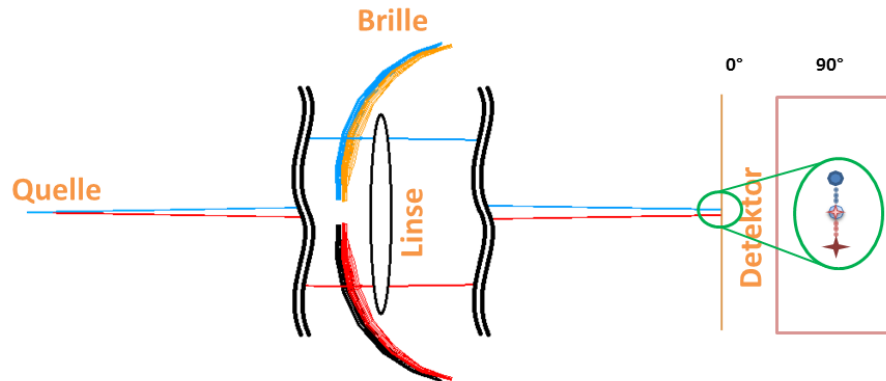


Abbildung 5.4: Simulationsumgebung für die Berechnung der prismatischen Wirkungsdifferenz. Der Strahlengang ist verkürzt aufgezeigt. Der Detektor ist zusätzlich in der Seitenansicht zu sehen.

Das Modul zur Berechnung der sphärischen und astigmatischen Wirkung greift auf die Brechkraft in verschiedenen Meridianen zurück (Quellcode siehe Anhang A1, Abbildung 10.14 und 10.15). Pro Meridian wird der Fokuspunkt eines Strahlenbündels (30 Strahlen auf 20 cm Länge), das die Vorder- und Rückseite der Schutzbrille durchdringt aufgezeichnet (siehe Abbildung 5.1 Nummer 4). Bei 50 Rotationen der Quelle um jeweils  $180^\circ/50$  (Zentrum ist die optische Achse des Auges) werden alle 50 Fokuspunkte berechnet. Der Minimal- und Maximalwert der Fokuspunkte dient zur Berechnung der sphärischen und astigmatischen Wirkung. Der Mittelwert der Brechkraftextreme liefert dabei die sphärische Wirkung und der Brechkraftunterschied die astigmatische Wirkung.

Das letzte Basismodul dient der Aufzeichnung der Wellenfront (Abbildung 5.5). Hier wird eine kreisrunde ebene Wellenfront (100 x 100 Strahlen vor der Kreisblende mit einem Durchmesser von 10 mm) auf die Scheibe projiziert und von einem ebenen Detektor aufgezeichnet (Quellcode siehe Anhang A1, Abbildung 10.7 bis 10.11). Aufgrund des in der Regel dominanten Prismas wird in einem zweiten Schritt der Detektor so verkippt, dass die prismatische Wirkung nicht mit aufgezeichnet wird. Die resultierende Wellenfront enthält daher kein Prisma.

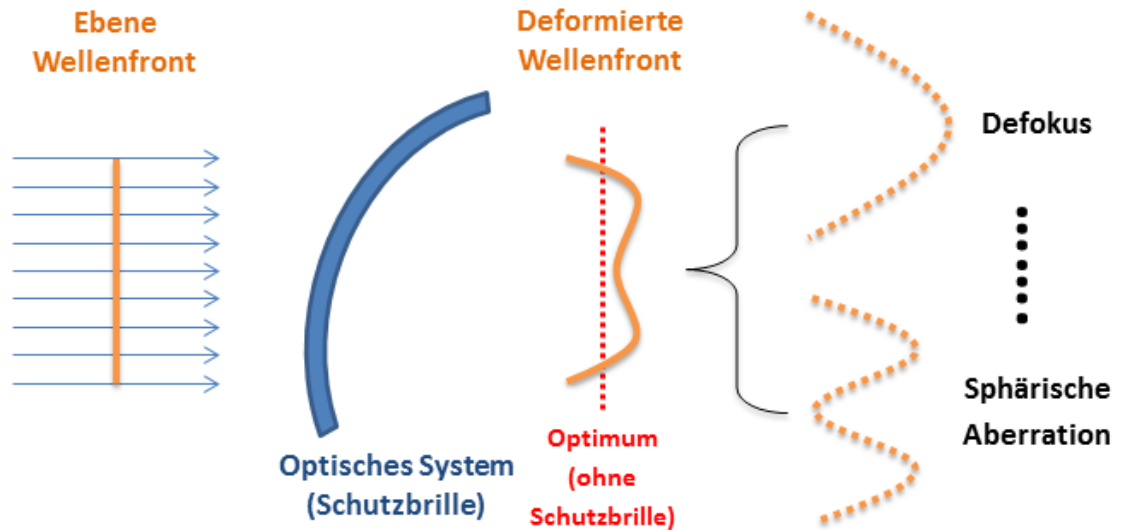


Abbildung 5.5: Beeinflussung einer ebenen Wellenfront beim Durchdringen der rechten Seite einer Schutzbrille. Die *deformierte* Wellenfront kann anschließend in Zernikekomponenten (z.B. Defokus oder sphärische Aberration) zerlegt werden und die Koeffizienten extrahiert werden.

### 5.3 Simulation verschiedener Blickneigungen

Eine wichtige Erweiterung im Vergleich zu herkömmlichen optischen Betrachtungen, die sich auf den geraden Blick beschränken, ist die simulative Erfassung der optischen Kenngrößen bei verschiedenen Blickrichtungen. Die in Kapitel 3.1 erwähnte maximale Blickneigung von  $20^\circ$  wurde durch Verdrehung der Schutzbrille relativ zum Koordinatensystem realisiert. Die fünf Blickrichtungen (siehe Abbildung 5.6) werden im weiteren Text als *temporal*, *oben*, *nasal*, *unten* und *gerade* bezeichnet, unabhängig von der betrachteten Schutzbrillenseite. Zusätzlich wurde ein gewichteter Wellenfrontfehler eingeführt, der alle fünf Wellenfrontfehler addiert. Aufgrund des höheren Einflusses des geraden Blickes auf die optische Güte der Schutzbrille wurden die Blickrichtungen wie folgt gewichtet: Gerader Blick – Faktor  $\frac{3}{11}$ , alle vier anderen Blickrichtungen – Faktor  $\frac{2}{11}$ .



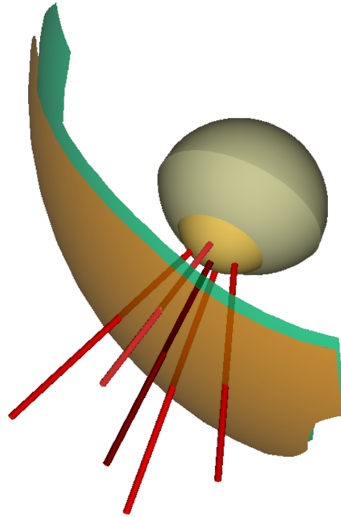


Abbildung 5.6: Veranschaulichung der fünf untersuchten Blickrichtungen. Gezeigt ist die rechte Hälfte einer Schutzbrille. Jede Blickrichtung ist gegenüber dem geraden Blick um  $20^\circ$  geneigt.

## 5.4 Validierung

Die Validierung des Wellenfrontmoduls wurde durch ein Testszenario und zwei komplementären Optik-Design-Plattformen (OSLO, Lambda Research Corporation, Littleton, USA und Raytrace, Universität Erlangen, Erlangen, Deutschland) durchgeführt. Das Szenario wurde folgendermaßen aufgebaut:

- Wellenlänge: 632,8 nm
- Zentrierte konkav-konvexe sphärische Linse bei  $Z = 0$  (optische Achse)
- $R_1 = 79,8$  mm;  $R_2 = 80,3$  mm
- Mittendicke 1,4 mm
- Brechungsindex  $n = 1,491$
- Detektor bei  $Z = 15$  mm
- Kreisförmige Quelle (Durchmesser 20 mm; 17905 Strahlen)

Der hier verwendete Brechungsindex weicht geringfügig vom Brechungsindex des Polycarbonats ( $n = 1,581$ ) ab, wurde jedoch für die Validierung so gewählt. Die durch die sphärische Linse veränderte Wellenfront wurde jeweils durch den RMS und den PV Wert charakterisiert. Die Simulation ergab: ASAP (RMS =  $1,69 \lambda$ ; PV =  $5,81 \lambda$ ), OSLO (RMS =  $1,69 \lambda$ ; PV =  $5,84 \lambda$ ) und Raytrace (RMS =  $1,70 \lambda$ ; PV =  $5,70 \lambda$ ). Die maximale Abweichung der ASAP Werte von den zwei alternati-

ven Plattformen lag bei  $\text{RMS} = 0,6\%$  und  $\text{PV} = 1,9\%$ . Diese geringen Differenzen sind auf unterschiedliche interne Berechnungsverfahren im Randbereich des Strahlenbündels zurückzuführen. Beim Vergleich der simulierten sphärischen Wirkung ( $0,075 \text{ m}^{-1}$ ) mit der berechneten sphärischen Wirkung ( $0,074 \text{ m}^{-1}$ ) nach Formel 5.1 (Gullstrandgleichung für die dicke Linse [8]) zeigte sich ein Unterschied von  $1,4\%$ .

$$F = F_1 + F_2 - \frac{t}{n} F_1 F_2 \quad (5.1)$$

Dabei stehen  $F$  für Gesamtbrechkraft,  $F_{1/2}$  für Brechkraft der Vorder- und der Rückfläche,  $t$  für die Mittendicke und  $n$  für den Brechungsindex des Materials.

## 5.5 Schnittstelle zwischen dem Deflektometer und ASAP

Um gemessene Oberflächendaten in ASAP nutzen zu können, war eine Reihe von Anpassungen nötig. Dabei wurde ein phasenmessendes Deflektometer (3D-Shape GmbH, Erlangen, Deutschland) mit einer lateralen Genauigkeit von  $\pm 3 \text{ } \mu\text{m}$  PV und einem Krümmungsfehler von  $0,01 \text{ m}^{-1}$  benutzt. Diese Messmethode stellt ein berührungsloses Messverfahren unter Zuhilfenahme der Streifenreflexion dar. Die Ausgangsdaten (gemessen mit einem Deflektometer) lagen in Form einer Punktwolke im binärem Datenformat vor. Benachbarte Höhen des horizontal und vertikal gleichabständigen Gitters hatten einen Abstand von  $80 \text{ } \mu\text{m}$ . Die Konvertierung in eine in ASAP einlesbare Datei erfolgte über ein MATLAB Skript (MathWorks, Natick, USA). Aufgrund des benötigten Dateih-Headers, der das Punktegitter bereits mit wenigen Angaben definiert, können horizontale und vertikale Werte der einzelnen Punktkoordinaten entfallen. Die Z Komponenten müssen ASAP konform angeordnet werden. Mit dem ASAP Befehl *SAMPLED* können dann bis zu 8 Mio. Punkte eingelesen werden, die linear miteinander zu einer optischen Fläche verbunden werden. Bei  $80 \text{ } \mu\text{m}$  Auflösung entspricht dies einer Fläche von  $226 \text{ mm} \times 226 \text{ mm}$ .

Um die Simulation von optischen Elementen in ASAP durchführen zu können muss im Falle der Schutzbrillenscheiben die Vorder- und Rückfläche zueinander referenziert sein. Es muss sichergestellt sein, dass die Messobjekte definiert im Raum vermessen werden, anderenfalls ist ein Stitching (Zuordnung) der Oberflächen nötig. Dies wurde durch einen Adapter zur Halterung der Spiegeleinsätze und der Schutzbrillenscheiben realisiert.

## 5.6 Zerlegung der Wellenfront in Zernikekomponenten

Die weitere Verarbeitung der in der Simulation aufgezeichneten Wellenfront wurde mit MATLAB realisiert. Dabei wurde das *zernfun* Skript von Paul Fricker herangezogen [12]. Die einzelnen Zernikepolynome und Normalisierungsfaktoren sind in Kapitel 3.2 aufgeführt. Sollen die Refraktionsdaten aus den Zernikekoeffizienten ermittelt werden, können die Umrechnungsformeln 3.1 bis 3.3 angewandt werden, da eine passende Zernikebasis gewählt wurde.

## 5.7 Einlesen bereits vorhandener Modelle

Ist das unter Abschnitt 5.1 definierte Schutzbrillenmodell nicht ausreichend, kann auf die Importfunktion von 3D Modellen mit *iges*-Format in ASAP zurückgegriffen werden. Dieses Format dient dem digitalen, herstellerunabhängigen Austausch zwischen CAD Programmen. Bevor jedoch eine Konvertierung der *iges*-Daten stattfinden kann, müssen einige Einstellungen vorgenommen werden. Diese definieren z.B. die Einlesegenauigkeit, Begrenzungen von Flächen, Art der erzeugten Flächen oder Näherungsverfahren. Standardeinstellungen sind in Abbildung 5.7 zu sehen.

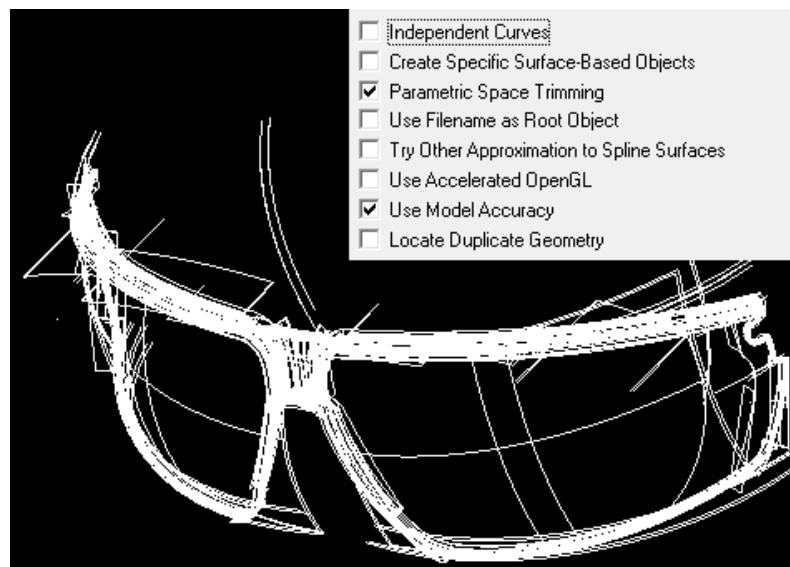


Abbildung 5.7: Komplexere Modelle können in ASAP durch die Importfunktion für *iges* Modelle eingelesen werden.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Analyse bestehender Optikdesigns

Es wurden sechs verschiedene Optikdesigns von Schutzbrillen analysiert, die der Schutzbrillenhersteller UVEX bereitstellte. Die Geometriedaten (Tabelle 6.1) wurden aus Gründen des Betriebsgeheimnisses auf ganze Millimeter gerundet. Die entsprechenden Simulationen wurden jedoch mit den exakten Werten durchgeführt.

Tabelle 6.1: Gerundete Geometriedaten und Mittendicken der untersuchten Schutzbrillendesigns. Die drei Schutzbrillenmodelle *super g*, *retrofit* und *super otg* besitzen eine durchgehende Scheibe, die beide Augen bedecken – hier entfallen die Werte  $R_{1off}$  und  $R_{2off}$ .

Variable	Einheit	<i>i-vo</i>	<i>pheos</i>	<i>gravity zero</i>	<i>super g</i>	<i>retrofit</i>	<i>super otg</i>
$R_1$		59	59	66	80	131	209
$R_2$		58	59	65	79	130	209
$R_{1off}$		14	14	11	0	0	0
$R_{2off}$	[mm]	14	14	11	0	0	0
$R_{12\_Z}$		2	2	2	1	1	1
<b>Dicke</b> (berechnet, $\alpha = 90^\circ$ )		3	2	3	2	2	2

Die drei Schutzbrillenmodelle *i-vo*, *pheos* und *gravity zero* mit hoher Krümmung machen einen gesonderten Seitenschutz überflüssig – sie umschließen den Kopf. Die zwei Modelle *retrofit* und *super otg* haben durch die flache Form einen seitlichen Schutz gegen das Eindringen von Fremdkörpern (Abbildung 6.1).

Bei den optischen Werten in Abbildung 6.2 handelt es sich um Kennwerte der Modellierung (SOLL – Werte), nicht zu verwechseln mit den optischen Werten der gefertigten Schutzbrillen (IST – Werte). Die ersten drei Spalten definieren die optische Güte beim geraden Blick durch die Schutzbrille. Der RMS-Wert des kompletten Wellenfrontfehlers (ohne prismatische Wirkung) beim geraden Durchblick



Abbildung 6.1: A: Schutzbrillenmodell *pheos*. Die stark gekrümmte Form legt sich um den Kopf und sorgt für einen ausreichenden Seitenschutz. B: Schutzbrillenmodell *super otg*. Bei flachen Scheiben ist ein extra Seitenschutz nötig – hierbei entstehen Kanten die das Sichtfeld einschränken. Quelle: <http://www.uvex-safety.com/en/products/safety-eyewear/product-highlights-eyewear/>

ist in Spalte vier angegeben. Der gewichtete Wellenfrontfehler in Spalte 5 (ohne prismatische Wirkung) beinhaltet alle fünf Blickrichtungen.

Tabelle 6.1 und Abbildung 6.2 sind nach dem Vorderflächenradius  $R_1$  sortiert. Hier ist eine Abhängigkeit der Abbildungsfehler von den Krümmungsradien zu erkennen. Die Einzelbestandteile des gewichteten Wellenfrontfehlers sind in Abbildung 6.3 dargestellt. Am Modell *pheos* sind exemplarisch die Wellenfrontfehler aller fünf Blickrichtungen (Abbildung 5.6) durch den RMS und PV Wert beschrieben.

Im Rahmen der typisch verwendeten Optikdesigns für Schutzbrillen (alle untersuchten Modelle) wird die maximale Blickneigung und der höchste Wellenfrontfehler bei nasaler Blickneigung zum Brillenzentrum hin erreicht. Beim Modell *pheos* steigt der RMS Wert im Vergleich zum geraden Blick um 94% an. Beim Modell *gravity zero* wird der RMS Wert bei geradem Blick ( $0,03 \lambda / 0,02 \mu\text{m}$ ) vom Wert bei nasaler Blickrichtung ( $0,44 \lambda / 0,28 \mu\text{m}$ ) um 1368% übertroffen. Bei den anderen Brillen erhöht sich der Wert um 178% (*i-vo*), 28% (*super g*), 94% (*retrofit*) und 91% (*super otg*).

In Abbildung 6.4 sind die einzelnen Zernikekoeffizienten des Modells *pheos* für alle fünf Blickrichtungen aufgeführt. Der Betrag jedes Koeffizienten lässt sich als RMS Wert dieses Abbildungsfehlers interpretieren. Das Optimierungspotential das bei den Optikdesigns zu erkennen ist, sowie die Erstellung neuer Designs wird in nach-

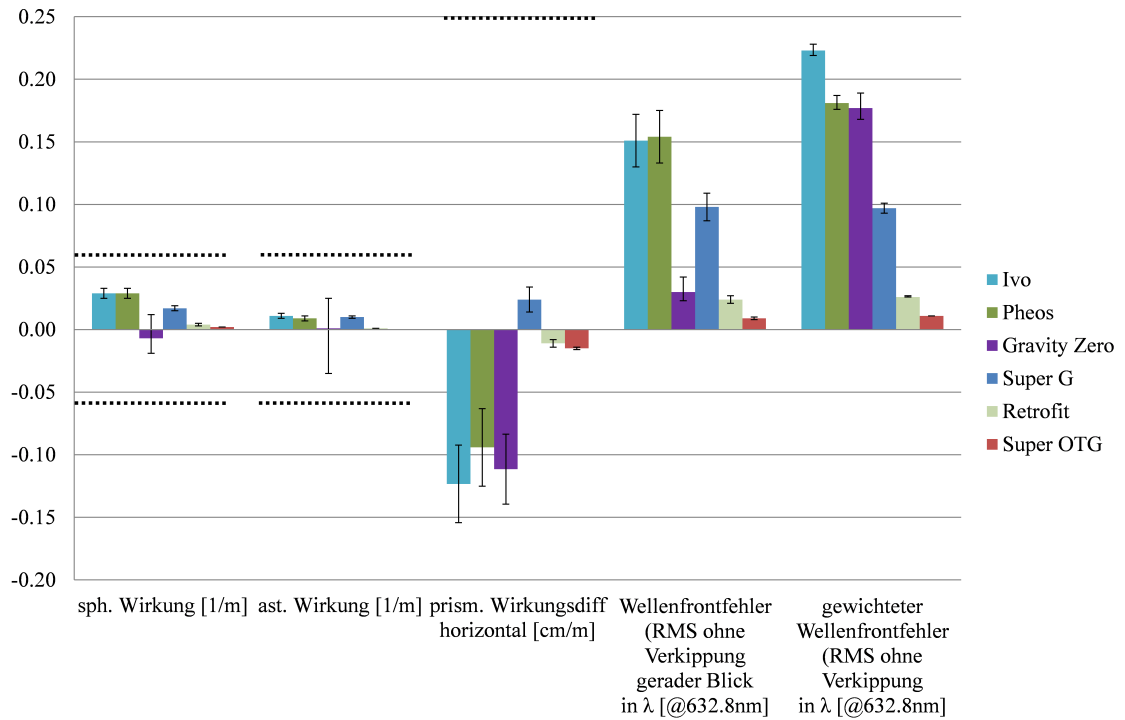


Abbildung 6.2: Simulation der optischen Kenngrößen von sechs untersuchten Optikdesigns. Dargestellt sind die sphärische und astigmatische Wirkung, die horizontale prismatische Wirkungsdivergenz, der Wellenfrontfehler des geraden Blickes und der gewichtete Wellenfrontfehler aller fünf Blickrichtungen. Aufgrund der Symmetrie entfällt die vertikale prismatische Wirkungsdivergenz. Grenzwerte nach DIN EN 166:2001 sind als gestrichelte Linie markiert. Die Balken beziehen sich auf die optische Toleranzrechnung auf Seite 39.

folgendem Abschnitt aufgezeigt. Bei Modellen mit bereits optisch guten Kenngrößen (*retrofit* und *super otg*) scheint eine Rückflächenoptimierung überflüssig.

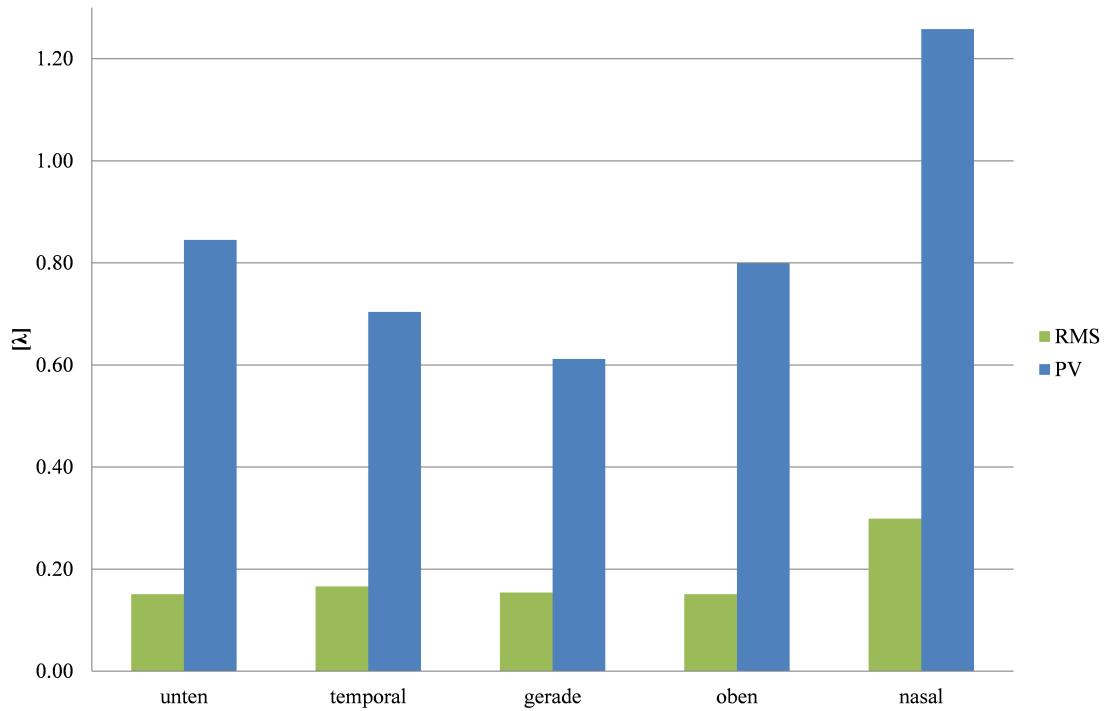


Abbildung 6.3: Wellenfrontfehler als RMS und PV der Schutzbrille *pheos* dargestellt.

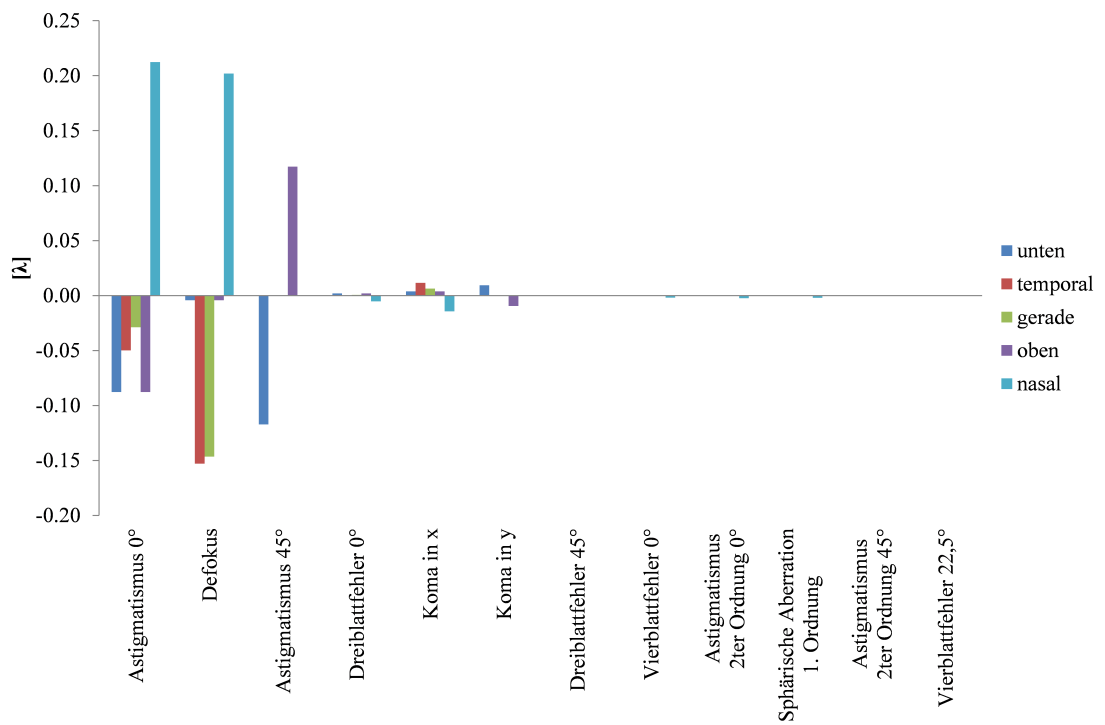


Abbildung 6.4: Zernikekoeffizienten der Wellenfronten für alle fünf Blickrichtungen anhand des Modells *pheos*. Der Betrag jedes Koeffizienten lässt sich als RMS Wert dieses Abbildungsfehlers interpretieren.

## 6.2 Optimierte und neue optische Designs

Soll das Grunddesign der Brille (sphärisch / asphärisch) nicht verändert werden kann die Rückfläche ( $R_{2off}$ ,  $R_2$ ,  $R_{12\_Z}$ ,  $\kappa_2$ ) angepasst werden um eine höhere optische Güte zu erreichen. Alternativ ist es möglich mit einer beliebigen Vorderfläche ( $R_{1off}$ ,  $R_1$ ,  $\kappa_1$ ) zu starten, was in einem neuen optischen Design resultiert. Die Optimierung der Rückflächen anhand sphärischer Designs fand in drei Schritten statt [30]. Zuerst wurden Schutzbrillen mit einem Deflektometer vermessen und in ein Modell übergeführt. Aus einer Messung der kompletten Vorderfläche wurde der Parameter  $R_{1off}$  extrahiert (bei planer Messung der halbe Abstand zwischen beiden Extrempunkten in Z-Richtung), aus der Rückflächenmessung der Parameter  $R_{2off}$ . Durch einen Kugelfit an jeder Front- bzw. Rückflächen-seite der Schutzbrille wurden die mittleren Radien  $R_1$  und  $R_2$  extrahiert. Mit der Dickenmessung unter  $\alpha = 90^\circ$  wurde der fünfte Parameter  $t$  gewonnen.

Analog kann mit bekannten Modelldaten direkt bei Schritt zwei begonnen werden. Im diesem Schritt wurde ein geeigneter Startwert für den Rückflächenradius ( $R_2$ ) nach Formel 6.2 berechnet. Als Basis dient die Gullstrandgleichung (Formel 5.1 auf Seite 26). Mit den Formeln 6.1 ergibt sich der Startwert für  $R_2$  für eine Brille mit refraktiver Nullwirkung.

$$F_1 = \frac{n-1}{R_1} \quad F_2 = \frac{1-n}{R_{2start}} \quad (6.1)$$

$$R_{2start} = \frac{R_1 n - t n + t}{n} \quad (6.2)$$

$R_{12\_Z}$  ergibt sich dann aus:

$$R_{12\_Z} = R_2 + t - R_1 \quad (6.3)$$

Eine Prüfung im Rastersuchverfahren (Änderung einer Variable pro Iteration; Schrittweite jeweils 0,01 mm, bei  $\kappa_2$  0,001) aller relevanten Kombinationen führte im letzten Schritt zu einem optimalen Parameterset und einer Schutzbrille mit höherer optischer Güte. Dabei wurde das Parameterintervall folgendermaßen festgelegt:  $R_{2start} \pm 2$  mm,  $R_{2off} \pm 0,1$  mm,  $R_{12\_Z} + 0,5$  mm bis  $-0,2$  mm und  $\kappa_2 \pm 0,03$ . Jede Prüfung bestand aus 3 Prüfgrößen: Dickentest (Bedeutung des Index siehe Tabelle 6.2), Test der prismatischen Wirkung und Test der Wellenfront. Um die Simulation zu beschleunigen wurde jede Iteration abgebrochen wenn:



- a) Die simulierte Mittendicke  $t_3$  kleiner als die gemessene Mittendicke  $t_1$  oder größer als die maximal definierte Mittendicke wurde:  $t_3 < t_1$  oder  $t_3 > 3$  mm.
- b) Die simulierte Seitendicke  $t_4$  kleiner als die gemessene Seitendicke  $t_2$  oder größer als die maximal definierte Seitendicke wurde:  $t_4 < t_2$  oder  $t_4 > 3$  mm.
- c) Die prismatische Wirkungsdifferenz größer wurde als der erste mit den Grundparametern simulierte Wert.
- d) Der Wellenfrontfehler des geraden Blicks größer wurde als der erste mit den Grundparametern simulierte Wert.

Nur Parametersets die keine der vier genannten Bedingungen erfüllten wurden gespeichert. Das Parameterset mit dem geringsten gewichteten Wellenfrontfehler wurde schließlich als optimales Parameterset ausgewählt. Unter der Bedingung die Dicke und damit die Schutzwirkung nicht zu unterschreiten wurden die prismatische Wirkung und der gewichtete Wellenfrontfehler aller Blickrichtungen optimiert. Drei verschiedene Schutzbrillenmodelle *Windor* (getönt, optische Klasse 1) (Infield, Solingen, Deutschland), *Axcont* (klar, optische Klasse 1) (Bolle, Suresnes, Frankreich) und *2720* (klar, optische Klasse 1) (3M, St. Paul, USA) wurden vermessen und optimiert (siehe Tabelle 6.2).

Stellvertretend für die Schutzbrillen *Windor* und *2720* (Anhang A2) sind die Simulationsergebnisse der Schutzbrille *Axcont* in Abbildung 6.5 graphisch dargestellt.

Mit Hilfe dieser Optimierungsschritte wurden drei weitere Optikdesigns neu erstellt. Die geometrischen und optischen Kennwerte der drei neuen Designs sind im Anhang A3, die Querschnitte in Abbildung 6.6 zu sehen. Bei asphärischen Modellen wurden die Vorderflächenparameter als Startwerte der Rückfläche genutzt. Die Startwerte des Modells *Design 3* ( $R_1$  und  $\kappa_1$ ) wurden in Referenz zur Kopfbreite festgelegt, sodass sich am unteren Rand eine maximale Breite von ca. 150 mm einstellt. Die Geometrieparameter des asphärischen Modells inklusive der konischen Konstanten ( $\kappa$ ) sind:  $R_1 = 126.25$  mm,  $\kappa_1 = 2$ ,  $R_2 = 125,74$  mm,  $\kappa_2 = 2,013$ ,  $R_{12\_Z} = 0,9$  mm.

Tabelle 6.2: Auflistung aller gemessenen und simulierten Werte. Die Simulation der optischen Güte wurde jeweils mit den gemessenen und den optimierten Parametern durchgeführt. Die Wellenfrontfehler beziehen sich auf den definierten Durchmesser von 10 mm. Die Angabe *gewichtet* bezieht sich auf den in Kapitel 5 definierten mittleren Wellenfrontfehler aller Blickrichtungen. Aufgrund der Symmetrie entfällt die vertikale prismatische Wirkungsdifferenz. Die Messgenauigkeit lag bei 0,15 mm für  $R_{1/2}$ , 0,01 mm für  $R_{1/2off}$  und 0,02 mm für die Dickenmessungen.

Hersteller / Modell	Infield Windor		Bolle Axcont		3M 2720	
Status	gemessen	optimiert	gemessen	optimiert	gemessen	optimiert
$R_1$	64,99	64,99	50,16	50,16	54,98	54,98
$R_2$	64,16	64,12	48,98	49,16	53,83	53,99
$R_{1off}$ [mm]	10,62	10,62	21,05	21,05	17,60	17,60
$R_{2off}$	10,62	10,66	21,05	21,07	17,55	17,56
$R_{12\_Z}$	1,44	1,44	1,28	1,70	1,32	1,67
<b>Dicke <math>t_1</math></b> (gemessen, $\alpha = 90^\circ$ )	2,26		2,46		2,48	
<b>Dicke <math>t_2</math></b> (gemessen, $\alpha = 30^\circ$ )	1,57		1,77		1,77	
<b>Dicke <math>t_3</math></b> [mm] (berechnet, $\alpha = 90^\circ$ )	2,27	2,31	2,46	2,70	2,47	2,66
<b>Dicke <math>t_4</math></b> (berechnet, $\alpha = 30^\circ$ )	1,54	1,54	1,81	1,81	1,84	1,84
<b>sphärische Wirkung</b> [ $m^{-1}$ ]	0,009	0,008	-0,070	0,008	-0,055	0,001
<b>astigmatische Wirkung</b> [ $m^{-1}$ ]	0,009	0,011	0,003	0,009	0,007	-0,010
<b>hor. pris. Wirkungsdiff.</b> [cm/m]	-0,059	0,005	-0,228	-0,039	-0,339	-0,180
<b>gerade</b>	0,051	0,049	0,380	0,037	0,300	0,014
<b>20° temporal</b>	0,074	0,065	0,354	0,056	0,240	0,062
<b>20° oben</b> RMS	0,164	0,172	0,566	0,250	0,483	0,250
<b>20° nasal</b> [ $\lambda$ ]	0,349	0,339	0,809	0,456	0,780	0,511
<b>20° unten</b>	0,164	0,172	0,566	0,250	0,483	0,250
<b>gewichtet</b>	0,150	0,149	0,521	0,194	0,443	0,199

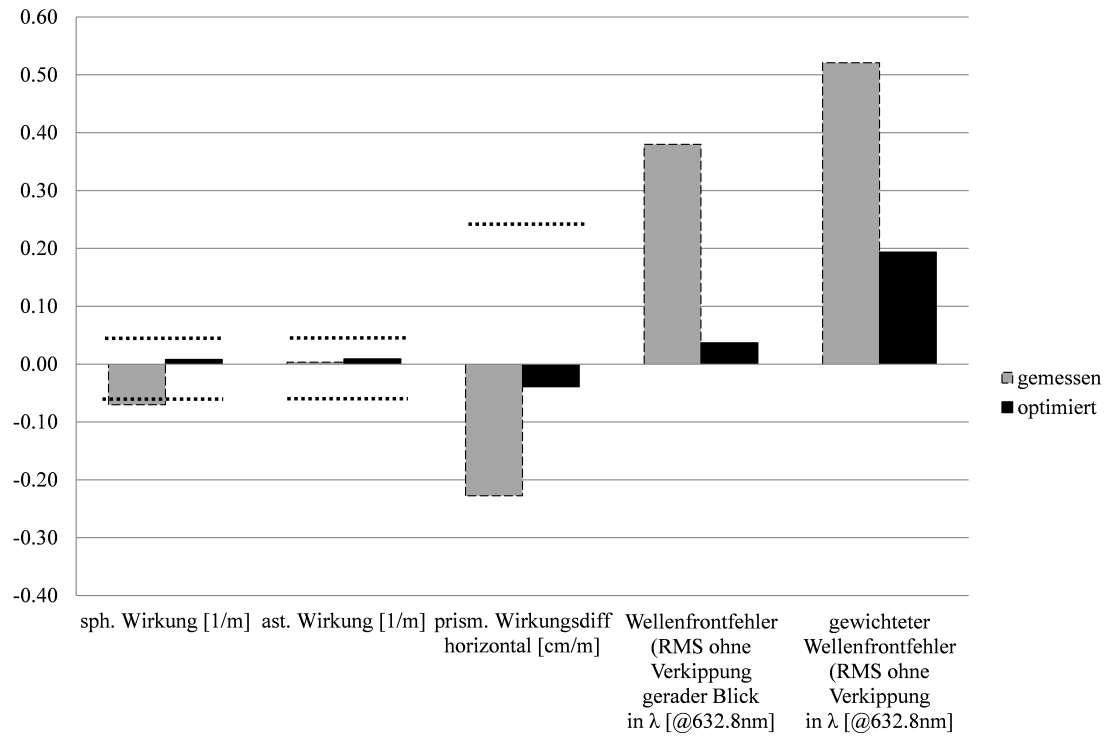


Abbildung 6.5: Simulierte optische Güte der Schutzbrille *Axcont* mit den gemessenen Parametern (grau) und den optimierten Parametern (schwarz). Die Grenzwerte von produzierten Schutzbrillen nach DIN EN 166:2001 sind als gestrichelte Linie eingezeichnet.

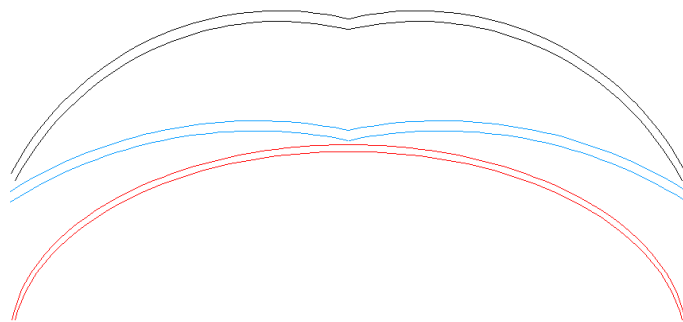


Abbildung 6.6: Querschnitt der Modelle *Design 1* (sphärisch, schwarz), *Design 2* (sphärisch, blau) und *Design 3* (asphärisch, rot).

### 6.3 Einfluss der Pupillendistanz

Da bisher alle optischen Designs auf die Normpupillendistanz von 64 mm optimiert wurden, wurde an drei bestehenden Modellen *pheos*, *super g* und *super otg* die Abhängigkeit der optischen Parameter von der Pupillendistanz simuliert (Abbildung 6.7). Laut der ANSUR Datenbank, mit 3976 Einträgen zur Pupillendistanz von Menschen weltweit, entspricht das Intervall zwischen 59,5 mm und 67,5 mm der einfachen Standardabweichung um den Mittelwert von 63,5 mm, d.h. 68,3% der Bevölkerung fallen in dieses Intervall [9].

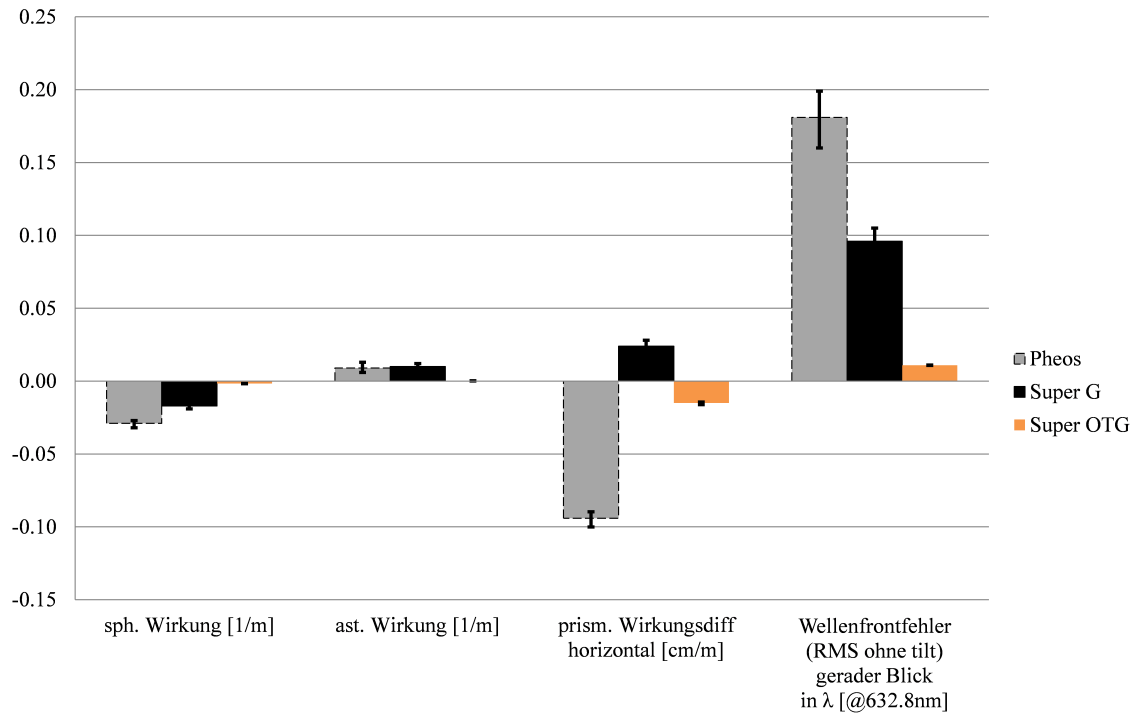


Abbildung 6.7: Veränderung der optischen Parameter in Abhängigkeit der Pupillendistanz in einem Intervall von  $63,5 \pm 4$  mm. Die Veränderung ist als Balken eingezeichnet.

Die größten prozentualen Abweichungen von den optischen Eigenschaften bei  $PD = 64$  mm sind: Abweichung der prismatischen Wirkungsdifferenz der *pheos* 6%, des gewichteten Wellenfrontfehlers der *pheos* 12% ( $\Delta_{RMS} = 0,039 \lambda / 0,025 \mu\text{m}$ ) und der *super g* 9% ( $\Delta_{RMS} = 0,018 \lambda / 0,011 \mu\text{m}$ ).

## 6.4 Einfluss der Beschichtung

Der Einfluss der Beschichtungen von Arbeitsschutzbrillen wurde bei bisherigen Berechnungen, Analysen und Optimierungen nicht mit einbezogen. Je nach Anwendungsbereich der Schutzbrillen wird auf der Innenseite der Scheiben eine Schicht gegen das Beschlagen der Brille und auf der Vorderseite eine kratzfeste Schicht aufgebracht. Beschichtungsdicken liegen im Bereich von ca. 20  $\mu\text{m}$ . Dabei hat die Innenseitenbeschichtung einen Brechungsindex von  $n = 1,25$  und die Außenseitenbeschichtung  $n = 1,45$ . Auf den Einfluss von Beschichtungsfehlern wie z.B. Wellen die durch ein unregelmäßiges Abfließen des Lackes zustande kommen wird hier nicht näher eingegangen, weil Schutzbrillen mit solchen Fehlern durch die subjektive / kosmetische Nachkontrolle aussortiert werden. Da der Brechzahlunterschied zwischen dem Scheibenmaterial (1,581) und der Beschichtung (1,25 bzw. 1,45) direkt proportional zur Brechkraft dieser Grenzfläche ist, wurde der *worst case* und somit eine Beschichtung mit einer Brechzahl von 1,25 simuliert.

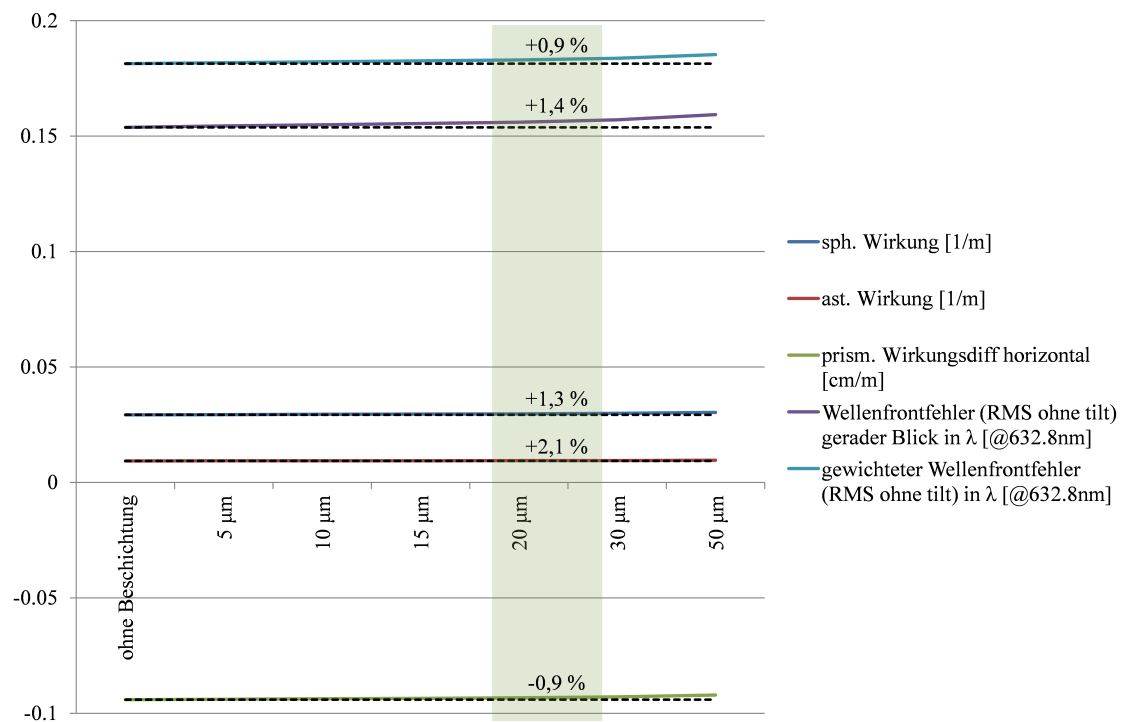


Abbildung 6.8: Änderung der optischen Eigenschaften der Schutzbrille *pheos* bei unterschiedlichen Beschichtungsdicken auf der Rückseite der Brille. Der Brechungsindex der Beschichtung liegt bei 1,25. Die Dicke der Schicht ist konstant. Eine Schichtdicke von 20  $\mu\text{m}$  stellt den Normalfall dar und ist grün gekennzeichnet.

Anhand der Schutzbrille *pheos* ist in Abbildung 6.8 der Einfluss der verschiedenen Schichtdicken zu erkennen (weitere Schutzbrille *Design 2* im Anhang A4). Mit einer Beeinflussung von maximal 2,1% im Falle der astigmatischen Wirkung ist der Einfluss von Beschichtungen auf die optischen Eigenschaften der Schutzbrille sehr gering. Im Falle der Außenbeschichtung für eine geringere Kratzempfindlichkeit ist dieser Einfluss durch den geringeren Brechungsindexunterschied noch geringer.

## 6.5 Einfluss des Rückflächenradius

Aufgrund von Schwankungen im Fertigungsprozess der Rückflächenform durch z.B. abrasive Wirkung beim Spritzgussprozess wurde untersucht, ab welchen Änderungen des Rückflächenradius das theoretische Design die Grenzwerte der optischen Klasse 1 überschreitet. Dabei wurde der Rückflächenradius der Schutzbrille *i-vo* iterativ von 56,2 mm bis 59,4 mm (Schrittweite 0,01 mm) verändert.

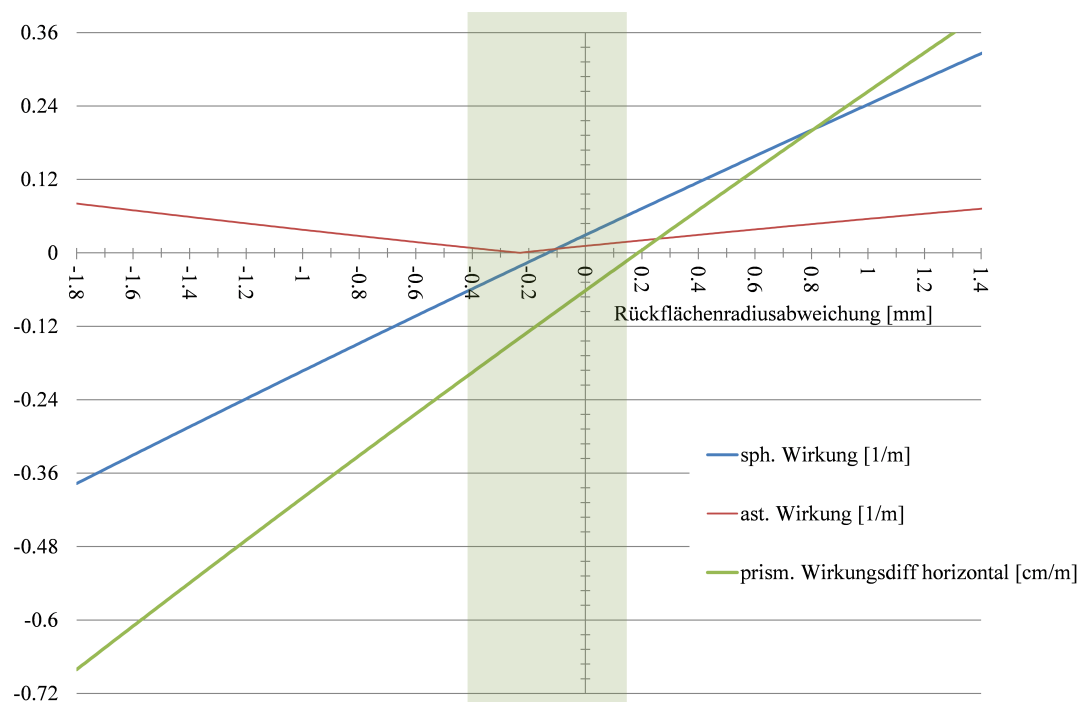


Abbildung 6.9: Änderung der optischen Eigenschaften der Schutzbrille *i-vo* bei variablem Rückflächenradius. Die Radiusänderung ist relativ zum Ursprungswert 58 mm eingetragen. Im grün-grau markierten Bereich liegen alle drei Werte innerhalb der Grenzwerte für die optische Klasse 1.

Abbildung 6.9 ist dabei zu entnehmen, dass bereits bei geringen Änderungen des Rückflächenradius die sphärische Wirkung die Grenzwerte der Güteklasse 1 überschreiten – die sphärische Wirkung definiert somit das Grenzwertintervall (grün-grau). Das entspricht einem  $R_2$  Intervall von 57,58 mm bis 58,15 mm und einer maximalen  $R_2$  Differenz vom Ursprungswert von 0,15 mm im Falle eines konstanten Vorderflächenradius. Die astigmatische Wirkung und vielmehr die prismatische Wirkungsdifferenz werden stärker von einer Abweichung des Rückflächenradius vom SOLL-Wert beeinflusst. Wird nicht nur eine Änderung des Parameters  $R_2$  erwartet ist eine optische Toleranzanalyse und der Variation aller Parameter sinnvoll.

## 6.6 Optische Toleranzrechnung

Eine wesentliche Fragestellung bei der Neuentwicklung von Schutzbrillendesigns war, inwieweit ein Design *optisch robust* ist. Mit welchen Fertigungsungenauigkeiten werden noch akzeptable optische Eigenschaften erreicht, bzw. welche minimalen optischen Eigenschaften werden bei gegebenen Fertigungstoleranzen erreicht. Sind die Fertigungstoleranzen aller einzelnen Parameter bekannt (Abbildung 5.2;  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_{1off}$ ,  $R_{2off}$ ,  $R_{12\_Z}$ ) lässt sich durch Variation dieser Parameter in ihren Grenzwerten der *worst case* der optischen Wirkung bestimmen. Dies ist der theoretisch optisch schlechteste Fall, der bei einer ungünstigen Konstellation der Herstellungstoleranzen in den Werkzeugen eintreten kann. Wird der Materialschwund durch das Abkühlen des Spritzrohrlings bereits bei der Werkzeugerstellung miteinbezogen, kann bei den Werkzeugvermessungen ein Verschleißpunkt definiert werden, bei dem eine Politur der Oberflächen von Nöten ist. In Absprache mit UVEX wurden die Prozesstoleranzen wie folgt festgelegt: Radien  $R_{1/2} \pm 0,005$  mm, Offsets  $R_{1/2off} \pm 0,005$  mm und Dicke  $t$  ( $\alpha = 90^\circ$ )  $\pm 0,01$  mm. Diese fünf Toleranzwerte führten zu den Abweichungen in Abbildung 6.2 auf Seite 30, die durch Balken dargestellt sind. Bei den simpleren Modellen *super g*, *retrofit* und *super otg* mit einer durchgehenden Scheibenkrümmung fallen die Offsetwerte  $R_{1/2off}$  und damit zwei Toleranzen weg.

Die maximalen Abweichungen in der sphärischen Wirkung liegen bei  $0,019 \text{ m}^{-1}$  (*gravity zero*), in der astigmatischen Wirkung bei  $0,036 \text{ m}^{-1}$  (*gravity zero*), in der prismatischen horizontalen Wirkung bei  $0,031 \text{ cm/m}$  (*pheos, i-vo*), im Wellenfrontfehler bei geradem Blick bei  $0,021 \lambda / 0,013 \mu\text{m}$  (*pheos, i-vo*) und im gewichteten Wellenfrontfehler bei  $0,012 \lambda / 0,008 \mu\text{m}$  (*gravity zero*).

## 6.7 Prozessanalyse

Da seitens des Projektpartners UVEX kein neues Design in ein fertiges Produkt inklusive Werkzeug umgesetzt werden konnte, wurden die folgenden Untersuchungen an sogenannten Rundscheiben durchgeführt (Abbildung 6.10). Diese Scheiben sind messtechnisch und simulativ als gleichwertig zu Schutzbrillen zu bezeichnen, d.h. gleicher Brechungsindex, vergleichbare Krümmungsradien und Dicken, usw..

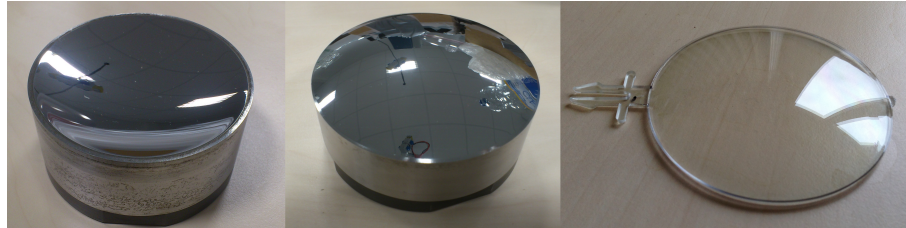


Abbildung 6.10: Aus zwei Spiegeleinsätzen bestehendes Set (A: konkav, B: konvex) zur Herstellung von Rundscheiben (C).

Anhand des Designs in Abbildung 6.11 wurde der Einfluss der Prozesskette zur Herstellung dieser Rundscheiben analysiert, also die optischen Abweichungen zwischen den Designdaten und den Spiegeleinsätzen und zwischen den Spiegeleinsätzen und der Rundscheibe.

Die Sollform in Abbildung 6.11 war bereits mit einem Offset von  $0,028 \text{ m}^{-1}$  in der sphärischen Wirkung versehen. Dies sollte den Einfluss durch die Abkühlung der Scheibe nach dem Spritzguss und der damit verbundenem Schrumpfung entgegenwirken, was jedoch nicht bestätigt werden konnte. Es wurden insgesamt vier Rundscheiben entnommen und vermessen. Spiegeleinsatz- und Rundscheibenoberflächen wurden mit einem Deflektometer (3D-Shape GmbH, Erlangen, Deutschland) nach der Methode von Speck et al. vermessen [26]. Die Messung der Mittendicken der Rundscheiben für die Definition des Abstandes beider vermessenen Oberflächen wurden mit einem Messschieber (1044SB, Mitutoya Deutschland GmbH, Neuss, Deutschland) durchgeführt. Für die optische Simulation der beiden Spiegeleinsätze wurde die gleiche Mittendicke wie bei Design gewählt (Tabelle 6.3; 2 mm).

In Tabelle 6.3 sind die Geometriewerte und die optischen Eigenschaften der drei Simulationen aufgeführt. So wurde das Rundscheibendesign (ideales theoretisches Modell *Design*), ein aus den zwei Spiegeleinsatzoberflächen generiertes Modell (*Werkzeugmodell*) und die vier Rundscheiben simuliert. Eine Rundscheibe setzt sich dabei aus den, mit dem Deflektometer vermessenen, Vorder- und Rückflächenmessdaten





Tabelle 6.3: Vollständiger Datensatz der drei simulierten Modelle. Bei der Simulation des Werkzeugmodells und der Rundscheibe ist nur der mittlere Radius angegeben. Die Simulation an sich wurde mit den gemessenen Oberflächendaten durchgeführt. Zu beachten ist, dass die konkave Seite des Designs und der Rundscheibe der konvexen Seite des Werkzeugmodells entspricht. Nach den Geometriedetails sind im zweiten Bereich die normierten Zernikekoeffizienten, im dritten die Wellenfrontfehler und im letzten Bereich die Refraktionswerte nach den Formeln (3.1) bis (3.3) aufgeführt.

Seite	Design		Werkzeugmodell		Rundscheibe 2	
	konkav	konvex	konvex	konkav	konkav	konvex
Radius	87,67	88,03	87,75	87,97	87,94	88,73
Globale Abweichung des Kugelfits (PV)	[mm]		0,013	0,015	0,040	0,018
Mittendicke		2,00	2,00		2,07	
Astigmatismus 0°		0	0,42		-1,41	
Defokus		-0,63	-1,41		-1,24	
Astigmatismus 45°		0	0,05		-0,64	
Dreiblattfehler 0°	[λ]	0	0,20		0,63	
Koma in x		0	-0,04		-0,03	
Koma in y		0	-0,06		0,33	
Dreiblattfehler 30°		0	-0,09		0,37	
Vierblattfehler 0°		0	-0,10		-0,41	
Astigmatismus 2. Ord. 0°		0	0,08		-0,20	
Sphärische Aberration		0	0,33		-0,07	
Astigmatismus 2. Ord. 45°		0	0,04		-0,06	
Vierblattfehler 22,5°		0	0,06		0,35	
PV	[λ]	2,23	6,80		13,16	
RMS		0,64	1,65		2,38	
Sphärische Wirkung	[m <sup>-1</sup> ]	0,028	0,062		0,067	
Astigmatische Wirkung	[m <sup>-1</sup> ]	0,000	0,026		0,119	
Achse α	[°]	0	41,4		32,8	

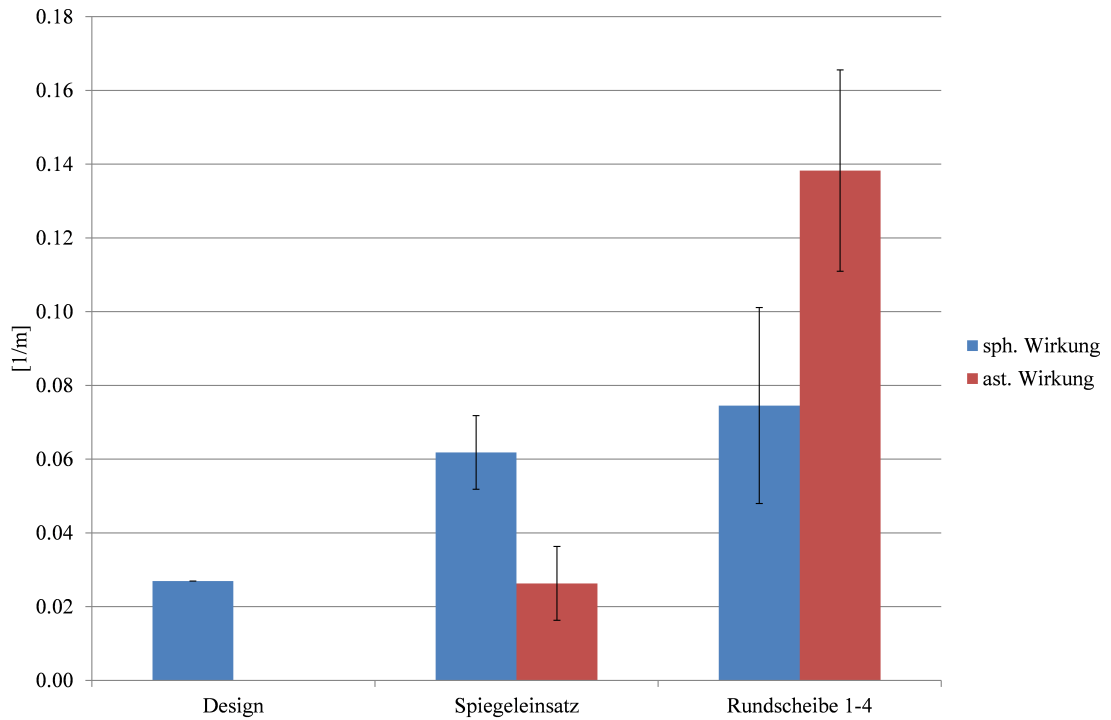


Abbildung 6.12: Vergleich der refraktiven Wirkungen der einzelnen Prozessschritte. Die Werte der Rundscheiben bilden sich aus den Mittelwerten der vier gemessenen Rundscheiben. Die Fehlerbalken repräsentieren die in Abschnitt 5.5 definierte Messgenauigkeit.

sind am Beispiel der Rundscheibe 2 alle drei Wellenfronten (Design, Werkzeugmodell, Rundscheibe 2) aufgezeigt.

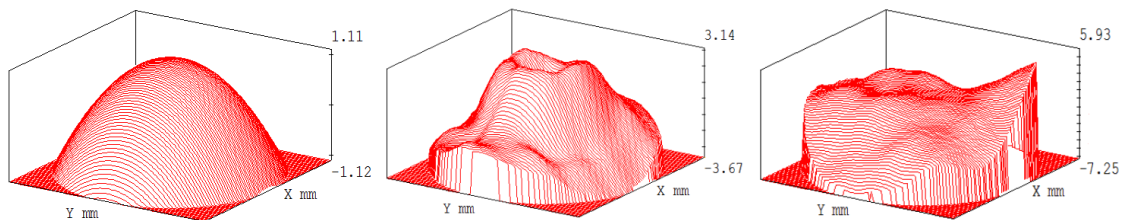


Abbildung 6.13: Vergleich der Wellenfronten. A: Design. B: Werkzeugmodell. C: Rundscheibe 2. Die Skalierung wurde für jedes Bild angepasst.

Der Defokus in der Wellenfront des Designs liegt bei  $-0,63 \lambda$  /  $-0,40 \mu\text{m}$ , des Werkzeugmodells bei  $-1,41 \lambda$  /  $-0,89 \mu\text{m}$  und der Rundscheibe 2 bei  $-1,24 \lambda$  /  $-0,78 \mu\text{m}$ . Die sphärische Aberration der Wellenfront des Werkzeugmodells liegt bei  $0,33 \lambda$  /  $0,21 \mu\text{m}$ . Eine grafische Darstellung aller Zernikekoeffizienten ist in Abbildung 6.14 zu sehen.

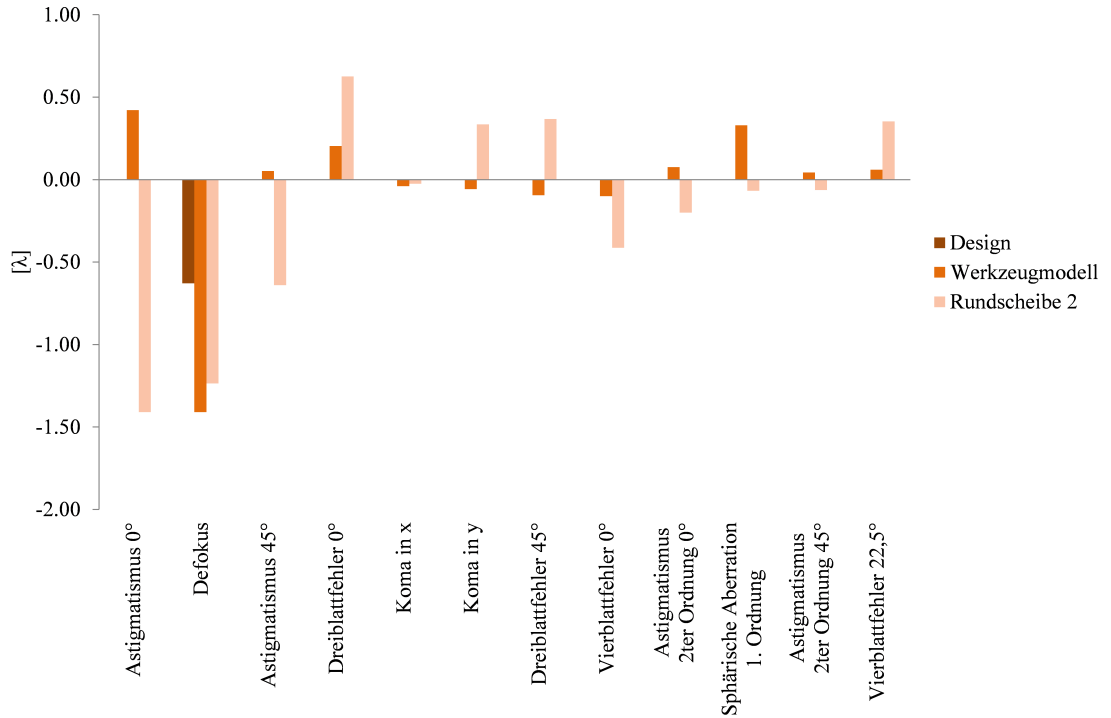


Abbildung 6.14: Zernikekoeffizienten der simulierten Wellenfronten. Der Betrag jedes Koeffizienten lässt sich als RMS Wert dieses Abbildungsfehlers interpretieren.

Der reine Defokus minimiert sich vom Werkzeugmodell zur Rundscheibe 2. Bis auf die Koeffizienten Defokus und sphärische Aberration sind alle Werte des Werkzeugmodells geringer im Vergleich zum Spritzgussteil. Der Wellenfrontfehlereintrag zwischen Design und Werkzeugmodell liegt bei  $\Delta_{RMS} = +1,01 \lambda / +0,64 \mu\text{m}$  und zwischen Werkzeugmodell und Rundscheibe bei  $\Delta_{RMS} = +0,73 \lambda / +0,46 \mu\text{m}$ .

## 7 Diskussion

Eine schlechte optische Qualität ist einer der Hauptgründe für die geringe Trageakzeptanz von Schutzbrillen. Vor allem bei längerem Arbeiten wird oft bewusst auf diese Schutzwirkung verzichtet und ohne Schutzbrille gearbeitet. Den wenigsten ist bewusst, dass selbst sehr dünne Brillen mit Dicken von ca. 1,5 mm in der Lage sind, 7 Gramm schwere, scharfkantige Projektile mit über 200 km/h aufzuhalten [25]. Mit dem Fortschritt in der Wissenschaft und Technik ist es heutzutage möglich, mit leistungsstarken optischen Berechnungsprogrammen und präzisen Messgeräten neben der Schutzwirkung von Schutzbrillen auch die optische Güte entscheidend zu verbessern. Indirekt kann damit die Trageakzeptanz erhöht und Verletzungen am Auge reduziert werden. Als Referenz für die optische Qualität von Schutzbrillen dienen die in der deutschen Norm DIN EN 166 / 167 genannten refraktiven Grenzwerte, die jede Schutzbrille in die optischen Klassen 1 bis 3 unterteilt. Im Rahmen dieses Projektes war die beste optische Klasse 1 bereits die maßgebliche Grenze, die nicht unterschritten werden sollte. Zur Prüfung, Analyse und Optimierung von sowohl theoretischen Optikdesigns, als auch von gemessenen Brillengeometrien diente eine eigens hierfür entwickelte Simulationsplattform. Auf Basis eines variablen Schutzbrillenmodells und verschiedenen Auswertemodulen konnten so Abhängigkeiten zwischen geometrischen Veränderungen und der optischen Qualität festgestellt werden.

In der Auswertung von sechs bereits bestehenden Designs wurde gezeigt, dass größere Radien und somit flachere Schutzbrillen für geringere Abbildungsfehler sorgen. Die Schutzbrillen wirken dann weniger als Linse und der Hauptanteil der Abbildungsfehler, die sphärische Wirkung wird stark reduziert. Die Schutzbrillen *i-vo* und *pheos* erreichen die höchsten Werte an sphärischer Wirkung von  $0,029 \text{ m}^{-1}$ . Hier ist schon durch das Brillendesign die Hälfte der erlaubten sphärischen Wirkung in der optischen Klasse 1 erreicht. Die erreichten astigmatischen Wirkungen sind gering mit Werten von  $0,011 \text{ m}^{-1}$  (*i-vo*) und  $0,009 \text{ m}^{-1}$  (*pheos*). Im Fall der prismatischen Wirkungsdifferenz liegt die Grenze der optischen Klasse 1 bei  $-0,75 \text{ cm/m}$  und  $0,25 \text{ cm/m}$ . Hier lässt sich ebenfalls der direkte Zusammenhang zwischen der Schutzbrillenkrümmung und der damit erzeugten prismatischen Wirkung erkennen.

Je dezentrierter die Sphäre und je höher die Krümmung desto höher die prismatische Wirkung.

Flachere Schutzbrillenformen reduzieren auch den gewichteten Wellenfrontfehler erheblich, d.h. eine flachere Schutzbrille ist unempfindlicher gegenüber verschiedenen Blickrichtungen. Blickneigungen über  $20^\circ$  bzw. in der Peripherie des Blickfeldes ist bei diesen Designs jedoch eine Kante aufgrund des Seitenschutzes zu erkennen. Insgesamt zeigte sich, dass die optische Beeinflussung aller untersuchten Designs bei nasaler Blickrichtung erhöht war – bei vier von sechs Designs um über 90% im Vergleich zum geraden Blick. Diese Tatsache spricht für eine Optimierung unter Einbeziehung aller Blickrichtungen und dem gewichteten Wellenfrontfehler, um ein starkes Gefälle zwischen dem geraden Blick und den seitlichen Blicken zu vermeiden. Neben der absoluten optischen Qualität könnte ein geringerer Unterschied in verschiedenen Blickrichtungen zu einer höheren Trageakzeptanz beitragen. Eine Wellenfrontzerlegung in die einzelnen Zernikekoeffizienten hat am Beispiel des Modells *pheos* ergeben, dass unter Einbezug des Vorzeichens zwischen dem geraden und dem nasalen Blick ein Unterschied im Defokus von  $0,35 \lambda / 0,22 \mu\text{m}$  existiert. Rechnet man den Defokus (Gleichungen 3.1 bis 3.3) in die sphärische Wirkung um, erhält man einen Unterschied von  $0,06 \text{ m}^{-1}$ . Dieser Betrag liegt im Falle der *pheos* in der Größenordnung der Grenzwerte für die optische Güteklasse 1. Dies legt nahe, dass die alleinige Betrachtung des geraden Blicks nicht ausreichend ist. So können trotz der geringen Abbildungsfehler beim geraden Blick relevante optische Schwankungen zwischen temporalem und nasalem Blick auftreten.

Der Effekt der Prismenkompensierung durch geringe Unterschiede in den Offsets  $R_{1off}$  und  $R_{2off}$  (erzeugt eine entgegengesetzte prismatische Wirkung) ist bei dem Modell *Windor* gut zu erkennen. Eine Differenz im Offset von 0,04 mm reduziert die prismatische Wirkungsdifferenz um 92%. Sowohl alle Modellparameter, als auch die anderen optischen Auswertegrößen bleiben annähernd konstant (siehe Tabelle 6.2). Die gewonnenen Erkenntnisse wurde in eine Optimierungsstrategie, basierend auf einer Anpassung der Rückfläche überführt. Nach der Optimierung der Designs *Windor*, *Axcont* und *2720* lagen alle optischen Kennwerte innerhalb der normativen Anforderungen der optischen Klasse 1. Bei dem Design *Windor* erhöhte sich die Dicke ( $\alpha = 90^\circ$ ) um 0,24 mm bzw. 10%, was zu einer höheren Festigkeit führt. Es ist anzumerken, dass bei ähnlichen Radien (zwischen 49 und 65 mm), der selben Schutzklasse F (Belastungstest bei 45 m/s mit einer 0,86 g Stahlkugel) und der selben optischen Klasse 1 die Mittendicke und Seitendicke des Designs *Windor* um ca. 0,2 mm / 8% dünner sind als bei den beiden anderen Designs. Es ist daher davon

auszugehen, dass die beiden anderen Designs *Axcont* und *2720* mechanisch höher belastbar sind.

Das Optimierungsverfahren von bestehenden, aber auch neuen Designs wurde mittels Rastersuchverfahren durchgeführt, um alle Zwischenmaxima des gewichteten Wellenfrontfehlers zu finden. Die optischen Kennwerte der neu generierten optischen Designs 1 bis 3 lassen auf bestimmte Abhängigkeiten schließen. So eignet sich *Design 1* mit einem Vorderflächenradius von 65 mm (hohe Krümmung) durch den seitlichen Schutz gut für Umgebungen mit der Gefahr von umherfliegenden Teilen auf Kosten höherer Abbildungsfehler. Mit einem Vorderflächenradius von 100 mm bei *Design 2* hat diese Schutzbrille eine bessere optische Güte bei verringertem Seitenschutz. *Design 3* vereint beide positiven Effekte der flachen Front (gute optische Qualität) und stark gekrümmten Seiten (hoher seitlicher Schutz) auf Kosten einer asphärischen Fläche und einem komplexeren Herstellungsprozess. Ein weiterer Vorteil von *Design 3* ist der stetige optische Übergang in der Schutzbrillenmitte. Die optischen Wirkungen aller drei generierten Optikdesigns liegen innerhalb der optischen Klasse 1. Maximalwerte werden bei *Design 1* mit  $0,014 \text{ m}^{-1}$  in der sphärische Wirkung und  $0,007 \text{ m}^{-1}$  in der astigmatische Wirkung erreicht. Somit ist es mit dieser beschriebenen Vorgehensweise und unter Einbeziehung der verschiedenen Blickrichtungen möglich, qualitativ hochwertige Optikdesigns zu generieren bzw. bestehende Designs zu optimieren.

Die Untersuchung der optischen Toleranzen hat ergeben, dass das Design *gravity zero* unter allen untersuchten Geometrien das am wenigsten robuste ist. Die im optimalen Fall gute sphärische und astigmatische Wirkung ( $-0,007 \text{ m}^{-1}$  bzw.  $0,001 \text{ m}^{-1}$ ) erhöht sich auf maximal  $-0,018 \text{ m}^{-1}$  bzw.  $-0,035 \text{ m}^{-1}$ . Das geometrische Design der drei Modelle *super g*, *retrofit* und am meisten die sehr flache *super otg* sind am robustesten gegenüber Veränderungen in den Geometrieparametern. Die zwei Modelle *i-vo* und *pheos* sind aufgrund der ähnlichen Designdaten ebenfalls ähnlich robust. Bezogen auf die in DIN EN 166:2001 definierten Grenzwerte ist insgesamt festzustellen, dass Prozessparameterschwankungen in den untersuchten Toleranzbereichen zu Schutzbrillen der besten optischen Klasse 1 führen.

Aufgrund des verwendeten Raytracers ASAP und der Anzahl an Datenpunkte mussten die Punktwolken über den Befehl SAMPLED eingelesen werden. Die importierten Messdaten (Punktwolke) werden dabei durch eine Linearisierung miteinander zu einer wirksamen optischen Fläche verbunden. Alternativen ergeben sich durch das Fitten der Punktwolke an geeignete Geometrien, wie z.B. Sphären, Asphären oder Quadriken (allgemeine Form). Sind die neuen robusten Designs erstellt, kann nach

dem Spritzgussprozess überprüft werden, inwiefern sich die optische Qualität verändert hat. Der durch die Werkzeugerstellung eingebrachte Anteil der sphärischen Wirkung liegt bei  $0,034 \text{ m}^{-1}$  und die Erhöhung nach dem Spritzguss bei zusätzlichen  $0,005 \text{ m}^{-1}$ . Ungewollt eingebracht sind somit  $(0,067 - 0,028) \text{ m}^{-1} = 0,039 \text{ m}^{-1}$  (Grenzwert optische Klasse 1:  $0,06 \text{ m}^{-1}$ ). Die astigmatische Wirkung erhöhte sich auf  $0,119 \text{ m}^{-1}$ . Diese Rundscheibe fällt somit in die optische Klasse 2 (Grenzwert:  $0,12 \text{ m}^{-1}$ ). Die Hauptgründe liegen in einer Erhöhung des Wellenfrontfehlers bei der Werkzeugerstellung in dem eingebrachten zusätzlichen Defokus und beim Spritzguss in dem eingebrachten Astigmatismus. Eine sphärische Aberration von  $0,33 \lambda / 0,21 \mu\text{m}$  bei den untersuchten Spiegeleinsätzen ist durch die Deformation der Wellenfront des Werkzeugmodells im Mittenbereich aufgrund eines hohen Einspritzdruckes zu erklären. Dies lag an der unzureichenden Werkzeugerstellung. Beim Formungsprozess, der durch eine spanende Bearbeitung und anschließende Politur realisiert wurde, wurde über die optischen Mitte hinaus bearbeitet. Dies führte zu einem Doppelabtrag in einem kleinen Bereich um die Drehachse und zu diesem charakteristischen Wellenfrontfehler. Der charakteristische Wellenfrontfehler im Mittenbereich des Werkzeugmodells wurde durch den Spritzguss jedoch nicht abgebildet. Der Grund hierfür liegt darin, dass lokal begrenzte Fehler höherer Ordnung im Werkzeug nicht auf die gespritzte Scheibe übertragen werden und somit keinen simulativ messbaren Einfluss auf die optischen Eigenschaften des Endproduktes haben. Für solche Fehler in der Polycarbonatscheibe bzw. im aufgetragenen Lack ist die Charakterisierung der optischen Qualität über die Wellenfront und den Zernikekoeffizienten nicht geeignet, da die Einflüsse über den gesamten Messbereich aufintegriert werden. Eine Beschränkung erfolgte durch den kleinen vermessenen Bereich der Spiegeleinsätze und der Scheiben. Eine Simulation verschiedener Blickrichtungen war deshalb nicht möglich. Die Gründe für die abbildungsfehlerbehafteten Spiegeleinsätze liegen in dem Aufbau einer herstellerinternen Fertigung dieser Werkzeuge. Die Auswertung der Simulation zeigte, dass der eingebrachte für die Norm relevante Fehler (sphärische und astigmatische Wirkung) noch zu groß ist. So muss der Herstellungsprozess dieser Werkzeuge noch weiter optimiert werden. Unabhängig davon kann bei konstanten optischen Abbildungsfehlern eine Anpassung des Designs mit Hilfe der in Kapitel Abschnitt 6.2 genannten Vorgehensweise erfolgen.

Die Stärken dieser entwickelten Simulationsplattform liegen in der Erweiterung des in den Normen definierten *geraden Blicks* um weitere vier Blickrichtungen. Somit ist es möglich, optisch robustere Designs zu erstellen, die nicht nur beim geraden Durchblick eine hohe optische Güte aufweisen. Durch das Wellenfrontmodul kön-



nen auch Aussagen zu den komplexeren Abbildungsfehlern getroffen werden. Dies ermöglicht eine Charakterisierung der optischen Qualität der Schutzbrillen. Durch die flexible Gestaltung kann zudem eine Schutzbrille für andere Märkte wie z.B. Asien entwickelt werden, die z.B. kleinere Kopfformen oder geringere Pupillendistanzen berücksichtigt.

Zu den Schwächen gehören das komplexe iges-Modul zum Einlesen von 3D CAD Daten. Der ASAP eigene Algorithmus zur Wandlung der geometrischen Flächen in optisch wirksame Flächen ist mit der Einstellung vieler Parameter verbunden. Dies sollte bei einer künftigen Version verbessert werden. Weiterhin werden die Belastungseigenschaften der Scheibe gegenüber einer mechanischen Einwirkung während der Erstellung eines neuen Designs nur dadurch miteinbezogen, dass eine definierte Minstdicke nicht unterschritten wird. Eine Finite Elemente Untersuchung durch ein externes Softwareprogramm, z.B. ANSYS Workbench wäre nötig. Eine weitere Hürde ist die Konvertierung aller Messdaten in ein ASAP-kompatibles Format. Hier wurde ebenfalls auf externe Software (z.B. Matlab) zurückgegriffen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die optische Wirkung einer Schutzbrille hängt immer von Vorder- und Rückfläche, sowie von den Materialeigenschaften ab. Mit einer Oberflächenanalyse einer Werkzeughälfte kann nicht auf die optische Wirkung geschlossen werden. Nur durch eine Vermessung der Spiegeleinsätze und der Simulation beider gemessenen Flächen in Kombination konnte bereits vor dem Spritzgussprozess die optische Qualität bestimmt werden. Künftig kann an diesem Punkt bei Überschreiten der vorher festgelegten Grenzwerte eine Nachpolitur des Werkzeuges stattfinden, ohne den kosten- und zeitintensiven Herstellungsprozess von Schutzbrillen mit Spiegeleinsätzen ungenügender Qualität zu initialisieren.

Änderungen des Designs aufgrund von deterministischen optischen Fehlern im Prozess sind durch die Simulationsplattform in ein bestehendes Design integrierbar. So ist nicht die geringe sphärische Wirkung des Designs oder Spritzgusswerkzeugs das Ideal, sondern die Nullwirkung der assemblierten Schutzbrille, was durch Vorhalten eines Offsets beim Design erreicht werden kann.

Es wurde bei der Prozessanalyse in Abbildung 6.13 gezeigt, dass sich bestimmte kleine, lokale Oberflächenfehler im Werkzeug nicht, oder nur unwesentlich auf die optische Wirkung des gespritzten Teils auswirken. Die Ursache hierfür ist neben der gegenseitigen Beeinflussung der Oberflächenfehler auf der Vorder- und der Rückseite die Abbildungscharakteristik zwischen Werkzeug und Scheibe. Durch die Simulation festgestellte optische Fehler können mithilfe der detaillierten Überprüfung einem bestimmten Prozessschritt zugeordnet werden. Dies ermöglicht künftig eine Fehlersuche bei optisch ungenügenden Schutzbrillen.

Die aktuelle Prüfung von Schutzbrillenscheiben mit einer nach Norm aufgebauten optischen Messbank kann durch diese Simulationsplattform nicht ersetzt, sondern vielmehr ergänzt werden. Der Grund hierfür liegt in der unterschiedlichen Messung der optischen Qualität. Während bei der Simulation nur eine objektive Wellenfrontveränderung ausgewertet wird, ist bei der optischen Messbank der Prüfer selbst der Entscheidungsträger, der angibt wie gut oder schlecht eine Schutzbrille ist. Dies

führt zu einer subjektiven Bewertung der optischen Fehler und kann sich von den rein messtechnisch erfassten Ergebnissen unterscheiden. Der große Vorteil einer ausschließlich objektiven messtechnischen und simulativen Erfassung ist jedoch, dass auch Fehler im optischen Design und Fehler im Spiegeleinsatz erfasst werden können.

Die Simulationsplattform könnte durch die Einführung von weiteren Basiskurven für neue Designs weiter verbessert werden. Bisher sind nur sphärische (Radius) und asphärische (Radius und konische Konstante) Formen möglich. Weitere Formen wären bikonische Flächen (verschiedene Krümmungsradien und Konizitäten in beiden Meridianen) eine Kombination aus torischer und asphärischer Form und Quadriken (allgemeine Form) [19, 20]. Da davon auszugehen ist, dass Schutzbrillen aus Polycarbonat immer mit einer kratzfesten Schicht versehen werden, könnten künftige Simulation stets mit einer Beschichtung durchgeführt werden, auch wenn der Einfluss einer konstanten Schichtdicke als gering anzusehen ist. Eine weitere Verbesserung der Softwareplattform kann durch eine Simulation und Optimierung des Nahsehens erfolgen. Hier muss aufgrund der Vergenzbewegung der Augen die Pupillendistanz verringert werden, anstatt der ebenen Wellenfront mit einer sphärisch divergenten Wellenfronten gerechnet werden und es muss der schräge Durchblick berücksichtigt werden.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] American National Standards Institute (2003) Occupational and Educational Personal Eye and Face Protection Devices. ANSI Z 87.2 – 2003
- [2] Atchison A, Smith G (2000) Optics of the Human Eye, Bd. 1. Elsevier Health Sciences
- [3] Bayer (2001). Polycarbonat Makrolon. URL <http://plastics.bayer.com/plastics/emea/de/produkt/apec/datenblaetter/docId-2386/A8043.pdf>. 2013.03.19
- [4] Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik (2001) BGR 192 - Benutzung von Augen- und Gesichtsschutz. Bericht, Berufsgenossenschaftliche Zentrale für Sicherheit und Gesundheit
- [5] Dain S (2012) Materials for occupational eye protectors. Clin Exp Optom 95(2):129–139
- [6] Deutsches Institut für Normung e.V. (2002) Persönlicher Augenschutz – Anforderungen. DIN EN 166: 2001
- [7] Deutsches Institut für Normung e.V. (2002) Persönlicher Augenschutz – Optische Prüfverfahren. DIN EN 167: 1995
- [8] Diepes H, Blendowske R (2002) Optik und Technik der Brille. DOZ-Verlag Optische Fachveröffentlichung
- [9] Dogson N (2004) Variation and extrema of human interpupillary distance. Proc SPIE 5291:36–46
- [10] Eppig T (2005) Shack-Hartmann-Sensorik für die simultane Vermessung der Hornhaut-Oberfläche und der Abbildungsqualität des Auges. Diplomarbeit Fachhochschule Darmstadt
- [11] Eppig T, Zoric K, Speck A, Zelzer B, Götzelmann J, Nagengast D, Langenbucher A (2012) Wavefront analysis of personal eye protection. Opt Express 20(16):17806–17815

- [12] Fricker P (2008) Analyzing LASIK Optical Data Using Zernike Functions. Matlab Digest 1. URL <http://www.mathworks.de/matlabcentral/fileexchange/7687>. 2013.03.19
- [13] Fry G, Hill W (1962) The center of rotation of the eye. *Amer J Opt Arch Am A* 39(11):581–595
- [14] Hilford D, Lee L (2002) Here’s egg in your eye: an unusual penetrating eye injury. *Arch Ophthalmol* 120(5):666–667
- [15] Hoffmann B, Rostek R (2004) Arbeitsunfallstatistik 2002. Bericht, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Sankt Augustin. 132 – 140
- [16] Informoptic (2013). Verletzung an der Hornhaut. URL [http://www.perret-optic.ch/optometrie/symptomes\\_diagnostiques/symptomes/opto\\_symfor\\_d.htm](http://www.perret-optic.ch/optometrie/symptomes_diagnostiques/symptomes/opto_symfor_d.htm). 2013.04.22
- [17] International Organization for Standardization (1981) International Standard 4849. ISO 4849: 1981
- [18] Langenbucher A, Eppig T, Nagengast D, Börret R (2010). IVOS - Improved Vision for Occupational Eye Safety. Projektantrag
- [19] Langenbucher A, Eppig T, Seitz B, Janunts E (2011) Customized aspheric IOL design by raytracing through the eye containing quadric surfaces. *Curr Eye Res* 36(7):632–646
- [20] Langenbucher A, Viestenz A, Brünner A, Seitz B (2006) Ray tracing through a schematic eye containing second-order (quadric) surfaces using 4 x 4 matrix notation. *Ophthalmic Physiol Opt* 26(2):180–188
- [21] Lombardi D, Verma S, Brennan M, Perry M (2009) Factors influencing worker use of personal protective eyewear. *Accident Anal Prev* 41(4):755–762
- [22] Pedrotti F, Pedrotti L, Bausch W, Schmidt H (2008) *Optik für Ingenieure*. Springer
- [23] Schober H (1970). *Das Blickfeld und Umblickfeld*
- [24] Schwiegerling J (2004) *Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics*. SPIE
- [25] Speck A, Zelzer B, Eppig T, Langenbucher A (2013) Experimental assessment of eye protection efficiency against high speed projectiles. *Z Med Phys* 23(1):71–76

- [26] Speck A, Zelzer B, Langenbacher A, Eppig T (2012) Deflectometry for surface inspection and shape fidelity analysis for manufacturing and polishing of safety spectacle molds. DGAO Proc 113:p30
- [27] Thibos L, Applegate R, Schwiegerling J, Webb R (2002) Standards for reporting the optical aberrations of eyes. J Refract Surg 18(5):652–660
- [28] Wesemann W (2007) Korrektur der Aberrationen höherer Ordnung des Auges mit Brillengläsern - Möglichkeiten und Probleme. DOZ Optometrie 9:44–49
- [29] Wyant J (1992) Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology. Appl Optics 11:27–39
- [30] Zelzer B, Speck A, Langenbacher A, Eppig T (2013) Theoretical model for design and analysis of protection eyewear. Z Med Phys 23(2):120–128
- [31] Ziahosseini K (2010). Laser pointers pose danger to eyes. URL <http://www.bbc.co.uk/news/10266498>. 2013.04.22

# 10 Anhang

## A1

Nachfolgend sind die wichtigsten Codezeilen der Simulationsplattform aufgeführt. Zuordnen lassen sich die Einzelfragmente anhand der Menüstruktur von Abbildung 5.3 und anhand der Module in Kapitel 5.

```

?? Geometrietest
*****
$IF (BERECHNUNG) EQ 1 THEN
    ?? diese Variable wird im ersten Fenster bestimmt
    ?? Korrektur der Brillenposition (richtiger Abstand Hornhaut-Brillenrückfläche) und Dickenbestimmung
    $IF (MESSWERTE) EQ 0 THEN
        $IF (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 2 AND (ASPHAERISCH) EQ 0; &A_VARIATION KORREKTUR_DICKE 2 FLAECHEN
        $IF (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 2 AND (ASPHAERISCH) EQ 1; &B_VARIATION KORREKTUR_DICKE 2 FLAECHEN OPTICAL
        $IF (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 4 AND (ASPHAERISCH) EQ 0; &C_VARIATION KORREKTUR_DICKE 4 FLAECHEN
    $ENDIF
    $IF (MODELL) GE 20 AND (MODELL) LE 29 THEN
        WINDOW X -2075 2
        PROFILES 0 0 -21 OVERLAY
        WINDOW X -2075 0
        PROFILES 0 0 -101
        $VIEW
    $ELSE
        WINDOW Y 2
        PROFILES
        WINDOW X 2
        PROFILES
    $ENDIF
    $SCR 3
    D1:\D1.2\ [mm]
    D2:\D2.2\ [mm]
    (R1+ABS_R1R2-R2)
    \DUMMY:?
    ?? gibt ein Fenster aus "3": ANZAHL DER ZI
    ?? "\DUMMY:?" ist notwendig
$ENDIF

```

Abbildung 10.1: Menüpunkt 1: Geometrietest.

```

!! Einzelberechnung
*****
$IF (BERECHNUNG) EQ 2 THEN
&WERTE_UNMSCHREIBEN
!! so wird ein Unterprogramm aufgerufen - damit das funktioniert muss vorher der Code geladen werden
$IF (SPEICHERUNG) EQ 1 THEN
&VARIABLEN_EXPORT S1" S2" S3" S4" S5" S6" S7" LIT(R11) LIT(R22) LIT(ABS_Z_R11) LIT(ABS_Z_R22) !! aufruf des Unterprogramms und Übergabe der
$ENDIF
!! Korrektur der Brillenposition und Dickenbestimmung
$IF (MESSWERTE) EQ 0 THEN
$IF (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 2 AND (ASPHAERISCH) EQ 0; &A_VARIATION_KORREKTUR_DICKE_2_FLAECHEN
$IF (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 2 AND (ASPHAERISCH) EQ 1; &B_VARIATION_KORREKTUR_DICKE_2_FLAECHEN_OPTICAL
$IF (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 4 AND (ASPHAERISCH) EQ 0; &C_VARIATION_KORREKTUR_DICKE_4_FLAECHEN
$ENDIF
$IF (SIMULATION) EQ 1 THEN
PLOT=1
$READ ZSPH_AST.INR
&SPH_AST
$IF (SPEICHERUNG) EQ 1 THEN
&SPH_AST_EXPORT S1" S2" S3" S4" S5" S6" S7"
$ENDIF
$ELSEIF (SIMULATION) EQ 2 THEN
PLOT=1
$READ ZPRIS.INR
$IF (SPEICHERUNG) EQ 1 THEN
&PRIS_EXPORT S1" S2" S3" S4" S5" S6" S7"
$ENDIF
$ELSEIF (SIMULATION) EQ 3 THEN
PLOT=1
$READ ZOPD.INR
&ZOPD_5X
$SCR 4
Durchschnittswerte
P=U\PU\4 waves
RMS=\RMS.4\ waves
!DUHNY:??
!!&REG RMS_OBEN RMS_UNTEN RMS_MITTE RMS_LINKS RMS_RECHTS RMS !! mit &REG werden die Werte direkt im Command Output ausgegeben
$IF (SPEICHERUNG) EQ 1 THEN
&PU_RMS_EXPORT S1" S2" S3" S4" S5" S6" S7"
$ENDIF

```

Abbildung 10.2: Menüpunkt 2: Einzelberechnung - erster Teil.



?? Bei Rundscheiben kann kein Prisma gemessen werden

t 2

```

!! Iterationen am Brillenmodell
*****
$IF (BERECHNUNG) EQ 3 THEN <
$READ ZUPD.INR
$READ ZSPH_AST.INR

!! Abspeichern der Anfangswerte
ABS_R1R2_0=ABS_R1R2
R1_0=R1
R2_0=R2

$ITER VARIABLE (VAR_MIN) (VAR_MAX) -(N) AUSWERTEGROSSE
<
&TIC
!! selbsterklärend...
!! Start der Zeitmessung

!! Aktualisierung des variablen Parameters zu Beginn der Iteration
!! Bei Iteration von R1 und R2 soll die Dicke gleich bleiben --> daher muss ABS_R1R2 zusätzlich angepasst werden (siehe Blatt vom 15.5.12)
$IF (VAR_NR) EQ 1 THEN
  R1=VARIABLE
  R1_DIFF=-R1-R1_0
  ABS_R1R2=ABS_R1R2_0+R1_DIFF
  $ELSEIF (VAR_NR) EQ 2 THEN
    R2=VARIABLE
    R2_DIFF=-R2-R2_0
    ABS_R1R2=ABS_R1R2_0-R2_DIFF
  $ELSEIF (VAR_NR) EQ 3 AND (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 2 THEN
    $GO usecancel
  $ELSEIF (VAR_NR) EQ 3 AND (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 4 THEN
    ABS_Z_R1=VARIABLE
    $GO usecancel
  $ELSEIF (VAR_NR) EQ 4 AND (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 2 THEN
    $GO usecancel
  $ELSEIF (VAR_NR) EQ 4 AND (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 4 THEN
    ABS_Z_R2=VARIABLE
  $ELSEIF (VAR_NR) EQ 5 THEN
    ABS_R1R2=VARIABLE
  $ENDIF

!! Korrektur der Brillenposition und Dickenbestimmung
$IF (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 2 AND (ASPHAERISCH) EQ 0; &A VARIATION KORREKTUR_DICKE_2_FLAECHEN
$IF (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 2 AND (ASPHAERISCH) EQ 1; &B VARIATION KORREKTUR_DICKE_2_FLAECHEN OPTICAL
$IF (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 4 AND (ASPHAERISCH) EQ 0; &C VARIATION KORREKTUR_DICKE_4_FLAECHEN

!!Anzeige der Geometrie
$IF (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 4 THEN
  CONSIDER ONLY 1 2 3 4
$ELSEIF (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 2 THEN
  CONSIDER ONLY 1 2
$ENDIF
WINDOW X -2075 Z -2075
PROFILES
CONSIDER ALL

```

Abbildung 10.4: Menüpunkt 3: Iteration des variablen Brillenmodells - erster Teil.

```

!!Berechnung
$IF (SIMULATION) EQ 1 THEN
  $READ 2PRIS.INR
  SEQ_L=0
  AST_L=0
  PU_MITTE=0
  RMS_MITTE=0
  PU=0
  RMS=0
$ELSEIF (SIMULATION) EQ 2 THEN
  $SPH AST
  PRIS_WIRK_HORIZONTA=0
  PRIS_WIRK_VERTIKAL=0
  PU_MITTE=0
  RMS_MITTE=0
  PU=0
$ELSEIF (SIMULATION) EQ 3 THEN
  $SPH AST
  PRIS_WIRK_HORIZONTA=0
  PRIS_WIRK_VERTIKAL=0
  PU_MITTE=0
  RMS_MITTE=0
  PU=0
$ELSEIF (SIMULATION) EQ 4 THEN
  $ZOPD 5X
  PRIS_WIRK_HORIZONTA=0
  PRIS_WIRK_VERTIKAL=0
  SEQ_L=0
  AST_L=0
$ENDIF

!! OPD-RMS
!! Ausführen des schon eingelesenen Makros

!! im folgenden wird das Ausgabeformat definiert
!! "-FILE" für erste Iteration; erstellt neu
!! "+FILE" für alle folgenden Iterationen

$IO OUTPUT "D:\00 AUSWERTUNGEN\ALLGEMEINER SPEICHERORT\Iteration_Brillenmodell_Werte.TXT" -FILE(10)
$SCR 2
R1 R2 ABS_Z_R1 ABS_Z_R2 ABS_Z_R1R2 DICKE D1 D2 SEQ_L AST_L PRIS_HOR PRIS_VER PU_MITTE RMS_MITTE PU RMS
\R1.4 \R2.4 \ABS_Z_R1.4 \ABS_Z_R2.4 \ABS_Z_R1R2.4 \DICKE.4 \D1.4 \D2.4 \SEQ_L.4 \AST_L.4 \P_HOR.4 \P_VER.4 \PU_MITTE.4 \RMS_MITTE.4 \PU.4 \RMS.4
$ELSEIF (COUNT) LT (N) THEN
$IO OUTPUT "D:\00 AUSWERTUNGEN\ALLGEMEINER SPEICHERORT\Iteration_Brillenmodell_Werte.TXT" +FILE(10)
$SCR 1
\R1.4 \R2.4 \ABS_Z_R1.4 \ABS_Z_R2.4 \ABS_Z_R1R2.4 \DICKE.4 \D1.4 \D2.4 \SEQ_L.4 \AST_L.4 \P_HOR.4 \P_VER.4 \PU_MITTE.4 \RMS_MITTE.4 \PU.4 \RMS.4
$ENDIF
$IO OUTPUT CLOSE
$CHO ALL
$ENDIF

```

Abbildung 10.5: Menüpunkt 3: Iteration des variablen Brillenmodells - zweiter Teil.

```

??GESAMTZEIT
&ITERATION_AUSGABE LIT(COUNTER) LIT(N+1)
}
DISPLAY ITER
$IF (SIMULATION) EQ 1 THEN
  I1="opt. Wirk."
$ELSEIF (SIMULATION) EQ 2 THEN
  I1="Spn. Wirk."
$ELSEIF (SIMULATION) EQ 3 THEN
  I1="ast. Wirk."
$ELSEIF (SIMULATION) EQ 4 THEN
  I1="RMS Wert."
$ENDIF
$IF (VAR_NR) EQ 1 THEN
  I2="in Abhaengigkeit von R1"
$ELSEIF (VAR_NR) EQ 2 THEN
  I2="in Abhaengigkeit von R2"
$ELSEIF (VAR_NR) EQ 3 THEN
  I2="in Abhaengigkeit von ABS_2_R1"
$ELSEIF (VAR_NR) EQ 2 THEN
  I2="in Abhaengigkeit von ABS_2_R2"
$ELSEIF (VAR_NR) EQ 3 THEN
  I2="in Abhaengigkeit von ABS_R1R2"
$ENDIF
&ITERATION_GRAPH I1" I2"
RETURN
$ENDIF
RETURN

```

```

?? ohne INR-Endung beim Aufruf wird das Makro als *.MAC-File geöffnet
?? "Iteration X von N abgeschlossen." ist wegen ASAP immer N+1 ??SCHLEIFENZAEHLER??

?? Teil 1: Beschriftung
?? Speichere die Buchstaben in eine Variable

```

```

?? Graph incl variabler Beschriftung

```

Abbildung 10.6: Menüpunkt 3: Iteration des variablen Brillenmodells - dritter Teil.

```

?? Ausgabemakro
*****
ANZEIGE_OPD { 1
  DISPLAY
  $IF (PLOT) EQ 1 THEN
    PLOT3D 0.5 'OPD #1 Inklination Durchdringen der Brille'
  $ENDIF
}
Durchblickspunkt:
    ?? Macro lediglich für eine variable Ausgabe angelegt; Zahl steht für einzulesende Variablen
    ?? nicht Auskommentieren!
    ?? "}" an erster Position markiert das Ende eines Makros?
    ?? bei $00 innerhalb eines Makros darf die schließende Klammer NICHT an dieser Position stehen!

SPEICHERUNG_OPD { 1
  $IF (SPEICHERUNG) EQ 1 THEN
    &WRITE_DIN_MIT_7_STRINGS $1" $2" $3" $4" $5" $6" $7" "\OPD_#1"
  $ENDIF
}
Durchblickspunkt:
    ?? Macro lediglich für eine variable Ausgabe angelegt; Zahl steht für einzulesende Variablen
    ?? "}" an erster Position markiert das Ende eines Makros?
    ?? bei $00 innerhalb eines Makros darf die schließende Klammer NICHT an dieser Position stehen!

?? Berechnungsmakro
*****
BERECHNUNG_OPD { 3
  $IF (ANZAHL_FLAECHEN) EQ 2 THEN
    CONSIDER ONLY 0 HINTEN UORNE OPD_DETEKTOR
  $ELSE
    CONSIDER ONLY 0 RECHTS.HINTEN LINKS.UORNE LINKS.UORNE OPD_DETEKTOR ??RECHTS.UORNE.BESCHICHTUNG LINKS.UORNE.BESCHICHTUNG
  $ENDIF
  $IF (PLOT) EQ 1 THEN
    WINDOW #1 -20100 #2 -50 120
    PROFILES OVERLAY
    SELECT ONLY SOURCE #3
    TRACE PLOT 100 COLORS #3
  $ELSE
    WINDOW #1 -20100 #2 -50 120
    SELECT ONLY SOURCE #3
    TRACE
  $ENDIF
  CONSIDER ALL
  CONSIDER ONLY OPD_DETEKTOR
  WINDOW V X
  PIXELS (NPIX=100)
  OPDMAP
  ?? (OPDRAYS/100)
  ?? Anzeigeraster

  ?? Abspeicherung des Ortes des Strahlenschwerpunktes für MOVE TO PLANE
  $CLEAR
  STATS POS
  $GRAB 'Centroid:' 0 1 XC YC ZC

```

Abbildung 10.7: Modul: Berechnung der OPD - erster Teil.

```

!! öffne OPDMAP & beschaffe Informationen um den Y-tilt (Drehung um die Y-Achse) zu entfernen
$CLEAR
$DISPLAY
!!PICTURE 'OPDmap unbearbeitet - mit Tilt'
REDUCE 1 (NPIX) 1, 20(INT[NPIX/2]+1) 1
!!GRAPH 0.5 'CROSS SECTION BEFORE TILT REMOVAL'
$CLEAR
REDUCE 1
$GRAB 'Polynomial for Best Fit to Data:' 2 1 FIT_A2 FIT_A3
!!GRAPH 0.5 'CROSS SECTION AFTER TILT REMOVAL'
RETURN

!! öffne OPDMAP & beschaffe Informationen um den X-tilt (Drehung um die X-Achse) zu entfernen
$DISPLAY
TRANPOSE
REDUCE 1 (NPIX) 1, 20(INT[NPIX/2]+1) 1
!!GRAPH 0.5 'CROSS SECTION BEFORE TILT REMOVAL'
$CLEAR
REDUCE 1
$GRAB 'Polynomial for Best Fit to Data:' 2 1 FIT_A0 FIT_A1
!!GRAPH 0.5 'CROSS SECTION AFTER TILT REMOVAL'
RETURN

!! Konvertiere die Fitparameter von Wellenlängen in Systemeinheiten
XANGFIT=FIT_A1*WL_SYSDU
YANGFIT=FIT_A3*WL_SYSDU
$DISPLAY
!! PICTURE 'OPD mit Tilt'
!!RETURN
!!$ASK

!! über MOVE TO wird der Detektor so gedreht dass der Tilt wegfällt
MOVE TO PLANE (XC) (YC) (ZC), TAN(XANGFIT) TAN(YANGFIT) 1
!! vor der Umstellung von der Z-Achse: MOVE TO PLANE (XC) (YC) (ZC), TAN(-XANGFIT

!! Eine neue Berechnung der OPD wird fällig
OPDMAP

$DISPLAY
!! PICTURE 'OPD ohne Tilt'
!!RETURN
!!$ASK
}
erste Betrachtungsachse:
zweite Betrachtungsachse:
zu wählende Quelle:

```

Abbildung 10.8: Modul: Berechnung der OPD - zweiter Teil.

```

!! OPD Berechnung incl. aller Blickrichtungen
*****
ZOPD_5X {
!! Inklination des Auges
!! 20X = 20° nach oben
!! -20X = 20° nach unten
!! 0 = durch die Mitte
!! -20Y = 20° nach links
!! 20Y = 20° nach rechts

!!Detektor
!!*****
$IF (OPD_MAKRO_COUNTER) EQ 0 THEN {
SURFACE Z (-15+3.8) ELLIPSE 15
OBJECT 'OPD DETEKTOR'
INTERFACE_COATING ABSORB AIR
SHIFT X -(PD/2)
REDEFINE COLOR 1
OPD_MAKRO_COUNTER=OPD_MAKRO_COUNTER+1
}
$ENDIF

!!QUELLEN FÜR 5 OPD'S
!!*****
BEAMS INCOHERENT GEOMETRIC
GRID ELLIPSE Z 0 -RM(RMS_BEAM_RADIUS) 20(OPDRAYS)
SOURCE DIRECTION 0 0 1, 0 0 1, 0 0 1, 0 0 1
SHIFT X -(PD/2)
SHIFT Z -100
RETURN

!!LIST SOURCES
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
&GROUP FLAECHEN LIT(ANZAHL_FLAECHEN)
ROTATE X -20 0 0
!! UND ROTIERE SIE UM DEN DREHPUNKT

&BERECHNUNG_OPD Y Z 1
&ANZEIGE_OPD "OBEN"
&SPEICHERUNG_OPD "OBEN"
$SERAB 'P-U Optical Path Difference' 0 1 PU_OBEN
$SERAB 'Wavefront Variance (RMS)' 0 1 RMS_OBEN
RETURN

CONSIDER ALL

```

Abbildung 10.9: Modul: Berechnung der OPD - dritter Teil.

```

!!!!!!!!222!!!!!!!!!!!!
&GROUP_FLAECHEN LIT(ANZAHL_FLAECHEN)
ROTATE X 40 0 0
&BERECHNUNG_OPD Y Z 2

&ANZEIGE_OPD "UNTEN"
&SPEICHERUNG_OPD "UNTEN"
$GRAB 'P-U Optical Path Difference' 0 1 PU_UNTEN
$GRAB 'Wavefront Variance (RMS)' 0 1 RMS_UNTEN
RETURN

CONSIDER ALL

!!!!!!!!333!!!!!!!!!!!!
&GROUP_FLAECHEN LIT(ANZAHL_FLAECHEN)
ROTATE X -20 0 0
&BERECHNUNG_OPD X Z 3

&ANZEIGE_OPD "GERADE"
&SPEICHERUNG_OPD "GERADE"
$GRAB 'P-U Optical Path Difference' 0 1 PU_MITTE
$GRAB 'Wavefront Variance (RMS)' 0 1 RMS_MITTE
RETURN

CONSIDER ALL

!!!!!!!!444!!!!!!!!!!!!
&GROUP_FLAECHEN LIT(ANZAHL_FLAECHEN)
ROTATE Y -20 0 -(PD/2)
&BERECHNUNG_OPD X Z 4

&ANZEIGE_OPD "TEMPORAL"
&SPEICHERUNG_OPD "TEMPORAL"
$GRAB 'P-U Optical Path Difference' 0 1 PU_TEMPORAL
$GRAB 'Wavefront Variance (RMS)' 0 1 RMS_TEMPORAL
RETURN

CONSIDER ALL

```

Abbildung 10.10: Modul: Berechnung der OPD - vierter Teil.



```

!!!!!!!!5555!!!!!!!!!!!!
&GROUP_FLAECHEN_LIT(ANZAHL_FLAECHEN)
ROTATE_Y 40 0 -(PD/2)
&BERECHNUNG_OPD X Z 5

&ANZEIGE_OPD "NASAL"
&SPEICHERUNG_OPD "NASAL"
$GRAB 'P-U Optical Path Difference' 0 1 PU_NASAL
$GRAB 'Wavefront Variance (RMS)' 0 1 RMS_NASAL
RETURN

CONSIDER ALL

&GROUP_FLAECHEN_LIT(ANZAHL_FLAECHEN)
ROTATE_Y -20 0 -(PD/2)

!! Gewichtung und Berechnung
!!
G1=2
G2=2
G3=3
G4=2
G5=2

PU=((PU_OBEN*G1)+(PU_UNTEN*G2)+(PU_MITTE*G3)+(PU_TEMPORAL*G4)+(PU_NASAL*G5))/(G1+G2+G3+G4+G5)
RMS=((RMS_OBEN*G1)+(RMS_UNTEN*G2)+(RMS_MITTE*G3)+(RMS_TEMPORAL*G4)+(RMS_NASAL*G5))/(G1+G2+G3+G4+G5)
AUSWERTEGROESSE=RMS
!! nur für Iterationen interessant

!!REG PU_OBEN PU_UNTEN PU_MITTE PU_LINKS PU_RECHTS PU_RMS_OBEN RMS_UNTEN RMS_MITTE RMS_LINKS RMS_RECHTS RMS
>

```

Abbildung 10.11: Modul: Berechnung der OPD - fünfter Teil.

```

then
  RAYS 0
  ?? IST KEINE BRILLE IM STRAHLENGANG FOKUSIERT SICH DIE QUELLE GENAU AUF DEM DETEKTOR BEI Z=-2000
  QUELLE_Z_PRIS=2000
  ?? damit dich die Strahlen genau am Detektor schneiden
  ?? Brillen werden immer auf den Abstand 15mm*HORNHAUT_BRILLE verschoben.
  OFFSET_PRIS=15+HORNHAUT_BRILLE-5
  ?? QUELLE
  ?? *****
  GRID ELLIPTIC 2 (QUELLE_Z_PRIS) -40(RADIUS_QUELLE) 20(PRISRAYS)
  SOURCE POSITION (PD/2) 0 0
  SHIFT Z (-(QUELLE_Z_PRIS*2)-OFFSET_PRIS)
  GRID ELLIPTIC 2 (QUELLE_Z_PRIS) -400.1 2010
  SOURCE POSITION -(PD/2) 0 0
  SHIFT Z (-(QUELLE_Z_PRIS*2)-OFFSET_PRIS)
$IF (PRIS_COUNTER) EQ 0 THEN {
  ?? DETEKTOR
  ?? *****
  LENSES
  PERFECT Z (-(OFFSET_PRIS) 1000 40
  OBJECT 'PRIS_PERFECTE_LINSE'
  REDEFINE COLOR 1
  ?? DETEKTOR
  ?? *****
  SURFACE
  PLANE Z (QUELLE_Z_PRIS-OFFSET_PRIS) ELLIPSE 50 50
  OBJECT 'PRIS_DETEKTOR'
  INTERFACE COATING ABSORB AIR
  PRIS_COUNTER=PRIS_COUNTER+1
}
$ENDIF
?? AUFBAU
?? *****
$IF (PLOT) EQ 1 THEN
  WINDOW X -20100 Z -20100
  TITLE 'Aufbau und Strahlengang Prisma'
  PROFILES OVERLAY
  TRACE PLOT
$ELSE
  TRACE
$ENDIF

```

Abbildung 10.12: Modul: Berechnung der prismatischen Wirkungsdifferenz - erster Teil.

```

!! AUSWERTUNG
!! =====

CONSIDER ONLY PRIS_DETEKTOR
SELECT ONLY SOURCE 1
$CLEAR
STATS POSITION
$GRAB 'Centroid' 0 1 FOKUSPUNKT_LINKS_X
$GRAB 'Centroid' 0 2 FOKUSPUNKT_LINKS_Y
SELECT ONLY SOURCE 2
$CLEAR
STATS POSITION
$GRAB 'Centroid' 0 1 FOKUSPUNKT_RECHTS_X
$GRAB 'Centroid' 0 2 FOKUSPUNKT_RECHTS_Y

PRIS_WIRK_HOR_LINKS=(FOKUSPUNKT_LINKS_X/10)/2
PRIS_WIRK_VER_LINKS=(FOKUSPUNKT_LINKS_Y/10)/2

PRIS_WIRK_HOR_RECHTS=(FOKUSPUNKT_RECHTS_X/10)/2
PRIS_WIRK_VER_RECHTS=(FOKUSPUNKT_RECHTS_Y/10)/2

PRIS_WIRK_DIFF_HOR=((FOKUSPUNKT_LINKS_X-FOKUSPUNKT_RECHTS_X)/10)/2 !! DIN NORM 167 S.6 Gelb markiert
PRIS_WIRK_DIFF_VER=((FOKUSPUNKT_LINKS_Y-FOKUSPUNKT_RECHTS_Y)/10)/2 !! oder S.7

AUSWERTERGROSSE=PRIS_WIRK_DIFF_HOR
!!GREG PRIS_WIRK_HORIZONTAL
CONSIDER ALL
SELECT ALL

$IF (PLOT) EQ 1 THEN
    $ECHO NONE
    !! kann ausgeschaltet werden
    !! Prevent console output writing to file

    $SCR 14
    !! ANZAHL DER ZEILEN DIE AUSGEGEBEN WERDEN!
    Prismatische Wirkungsdivergenz nach DIN 167 KOMPL. BRILLE
    Horizontal: \PRIS_WIRK_DIFF_HOR.4 \ [cm/m]
    Vertikal: \PRIS_WIRK_DIFF_VER.4 \ [cm/m]
    positiver Wert: Basis innen - ueberkreuzung der Strahlen
    negativer Wert: Basis aussen - keine ueberkreuzung der Strahlen

    Prismatische Wirkung nach DIN 167
    Links:
    Horizontal: \PRIS_WIRK_HOR_LINKS.4 \ [cm/m]
    Vertikal: \PRIS_WIRK_VER_LINKS.4 \ [cm/m]
    Rechts:
    Horizontal: \PRIS_WIRK_HOR_RECHTS.4 \ [cm/m]
    Vertikal: \PRIS_WIRK_VER_RECHTS.4 \ [cm/m]

    !DUMMY??
    $ECHO ALL
$ENDIF

!! Damit GRAB nicht auf alte Werte zurueckgreift
!! Damit GRAB nicht auf alte Werte zurueckgreift
!! mm --> cm --> DIN 167 durch 2 teilen (Abstand Brille Detektor = 2 Meter)

```

Abbildung 10.13: Modul: Berechnung der prismatischen Wirkungsdivergenz - zweiter Teil.

```

then
SPH_AST {
  !! SCHLEIFE, IN DER DER FOKUSPUNKT EINER STRAHLENREIHE (INSG. 180°)
  !! ERMITTELT UND ALS DIAGRAMM AUSGEZEICHNET WIRD .....
  !! .....
  $DOO 1 50
  {
    RAYS 0
    GRID RECT 2 -100 -40(SPH_AST_BEAM_RADIUS) (SPHASTRAYS) 1
    SOURCE DIRECTION 0 0 1
    ROTATE 2 ((?)*180/50)
    SHIFT X -(PD/2)
    !! muss insg 180° ergeben
    !! LINKE SEITE

    $IF ? EQ 1 AND (PLOT) EQ 1 THEN
      WINDOW X 2; TITLE 'Strahlengang Sphaere und Astigmatismus';
      PROFILES OVERLAY; MISSED ARROW 10; ARROW 1.5; TRACE PLOT
      !! X 0 80
    $ELSE
      TRACE
    $ENDIF

    FOCUS
    !! Berechnung des Fokuspunktes
    $GRAB 'Centroid Point' 0 3 FOKUSPUNKT
    !! Ausgabefenster: 0 ZEILEN NACH UNTEN UND 3TER NUMERISCHER EINTRAG
    !! Initialisierung

    $IF ? EQ 1 THEN
      MIN=MAX=FOKUSPUNKT
    $ENDIF

    $IF (FOKUSPUNKT) LT (MIN) THEN
      MIN=FOKUSPUNKT
    $ENDIF

    $IF (FOKUSPUNKT) GT (MAX) THEN
      MAX=FOKUSPUNKT
    $ENDIF

    !!$REG MIN MAX FOKUSPUNKT
  }

  !! siehe Analyse/Berechnung vom 4.4.12
  S MIN_DIOPTRIE=(MAX/1000)^-1
  S_Max_DIOPTRIE=(MIN/1000)^-1
  !! Berechnung des Scheitelbrechwertes in Dioptrie (1/m)
  !! Scheitelbrechwert = (bildseitige Schnittweite)^-1, falls optisches System in Luft
  !! Pluszylinder-schreibweise
  !! Berechnung der sphärischen Wirkung = kleinerer Scheitelbrechwert

  SPH_L=$ MIN_DIOPTRIE
  AST_L=$Max_DIOPTRIE-$ MIN_DIOPTRIE
  SEQ_L=SPH_L+($AST_L/2)

```

Abbildung 10.14: Modul: Berechnung der sphärischen und astigmatischen Wirkung  
- erster Teil.

```

$IF (SIMULATION) EQ 2 THEN
  AUSWERTEGROSSE=SEQ_L
$ELSE (SIMULATION) EQ 3 THEN
  AUSWERTEGROSSE=AST_L
$ENDIF

$ECHO NONE
$IF (BERECHNUNG) EQ 4 AND (COUNTER) EQ 0 THEN
  $IO OUTPUT SPH_AST_WERTE.TXT -FILE(10)
  $SCR 1
  \SEQ_L.4 \ \AST_L.4 \
  $IO OUTPUT CLOSE
  $ECHO ALL
$ELSEIF (BERECHNUNG) EQ 4 AND (COUNTER) LT (N) THEN
  $IO OUTPUT SPH_AST_WERTE.TXT +FILE(10)
  $SCR 1
  \SEQ_L.4 \ \AST_L.4 \
  $IO OUTPUT CLOSE
  $ECHO ALL
$ENDIF

$IF (PLOT) EQ 1 THEN
  $ECHO NONE
  $SCR 5
  Linke Seite
  Sphaerisches Equivalent (SEQ=SPH+(AST/2)): SEQ_L=SEQ_L.4\ 1/m
  Astigmatische Wirkung (Brechwertunterschied): AST_L=AST_L.4\ 1/m
  Sphaerische Wirkung (minimaler Brechwert): SPH_L=SPH_L.4\ 1/m
  \DUMMY:?
  $ECHO ALL
$ENDIF
)

```

```

!! nur für Iterationen interessant

$IF (SIMULATION) EQ 2 THEN
  AUSWERTEGROSSE=SEQ_L
$ELSE (SIMULATION) EQ 3 THEN
  AUSWERTEGROSSE=AST_L
$ENDIF

$ECHO NONE
$IF (BERECHNUNG) EQ 4 AND (COUNTER) EQ 0 THEN
  $IO OUTPUT SPH_AST_WERTE.TXT -FILE(10)
  $SCR 1
  \SEQ_L.4 \ \AST_L.4 \
  $IO OUTPUT CLOSE
  $ECHO ALL
$ELSEIF (BERECHNUNG) EQ 4 AND (COUNTER) LT (N) THEN
  $IO OUTPUT SPH_AST_WERTE.TXT +FILE(10)
  $SCR 1
  \SEQ_L.4 \ \AST_L.4 \
  $IO OUTPUT CLOSE
  $ECHO ALL
$ENDIF

!! Dieser Block schreibt bei jeder Iteration beide Werte (sph, ast) in ein File
!! Öffnen des Files in der ersten Iteration
!! das wird rein geschrieben
!! Schließen des Files

!! Die Iter Schleife macht nach der Nten Iteration nochmal eine. Mit '(COUNTER) LT (N)' wird die letzte
!! Schreiben in das geöffnete File bei allen weiteren Iterationen
!! das wird rein geschrieben
!! Schließen des Files

```

Abbildung 10.15: Modul: Berechnung der sphärischen und astigmatischen Wirkung  
- zweiter Teil.

```

?? RECHTS HINTEN
*****
SURFACE
GENERAL 0 0 0
C -(R2*R2)
X2 1
Y2 1
Z2 1
LOCAL -(ABS_Z_R2) (R2) -2B(R2) -(2*R2) -30
PARAMETERIZE 2
OBJECT 'RECHTS-HINTEN'
INTERFACE COATING TRANSMIT POLYCARBONAT
REDEFINE COLOR 3
?? LINKS HINTEN
*****
SURFACE
GENERAL 0 0 0
C -(R2*R2)
X2 1
Y2 1
Z2 1
LOCAL -(R2) (ABS_Z_R2) -2B(R2) -(2*R2) -30
PARAMETERIZE 2
OBJECT 'LINKS-HINTEN'
INTERFACE COATING TRANSMIT POLYCARBONAT
REDEFINE COLOR 3
?? RECHTS VORNE
*****
SURFACE
GENERAL 0 0 (-ABS_R1R2)
C -(R1*R1)
X2 1
Y2 1
Z2 1
LOCAL -(ABS_Z_R1) (R1) -2B(R1) -(2*R2) -30
PARAMETERIZE 2
OBJECT 'RECHTS-VORNE'
INTERFACE COATING TRANSMIT POLYCARBONAT
REDEFINE COLOR 3
?? LINKS VORNE
*****
SURFACE
GENERAL 0 0 (-ABS_R1R2)
C -(R1*R1)
X2 1
Y2 1
Z2 1
LOCAL -(R1) (ABS_Z_R1) -2B(R1) -(2*R2) -30
PARAMETERIZE 2
OBJECT 'LINKS-VORNE'
INTERFACE COATING TRANSMIT POLYCARBONAT
REDEFINE COLOR 3

```

?? Kugeloberfläche  
 ?? x, y, z Uersatz  
 ?? für die Darstellung als Mesh  
 ?? funktioniert mit der Brillenberandung

Abbildung 10.16: Modul: Vierflächiges variables Schutzbrillenmodell.

## A2

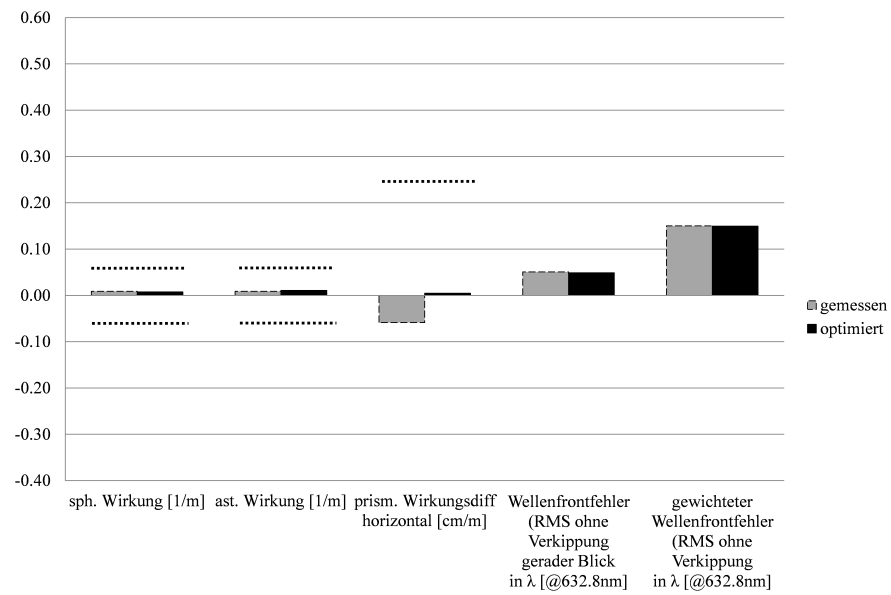


Abbildung 10.17: Simulierte optische Güte der Schutzbrille *Windor* (Infield) mit den gemessenen Parametern (grau) und den optimierten Parametern (schwarz). Die Grenzwerte von produzierten Schutzbrillen (DIN EN 166; optische Güteklasse 1) sind als gestrichelte Linie eingezeichnet.

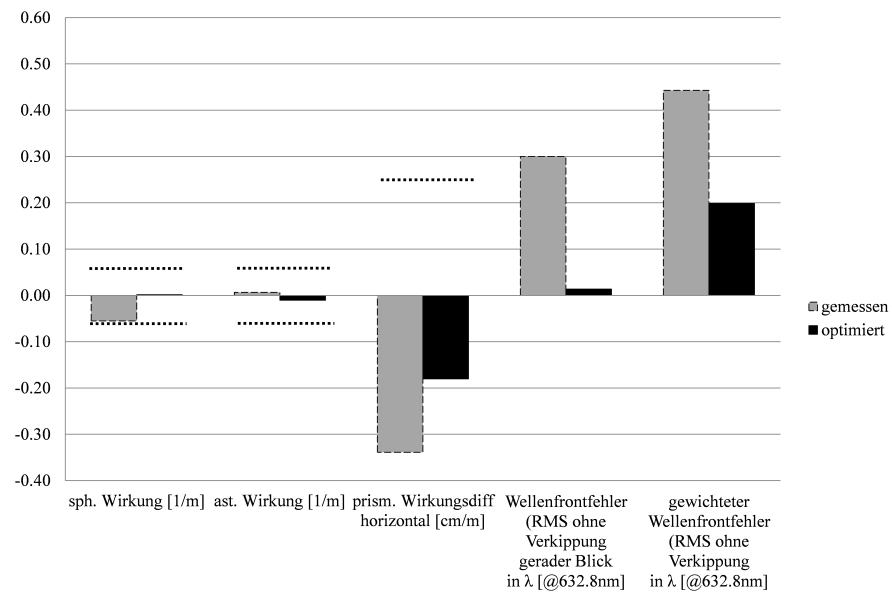


Abbildung 10.18: Simulierte optische Güte der Schutzbrille 2720 (3M) mit den gemessenen Parametern (grau) und den optimierten Parametern (schwarz). Die Grenzwerte von produzierten Schutzbrillen (DIN EN 166; optische Güteklasse 1) sind als gestrichelte Linie eingezeichnet.



## A3

Tabelle 10.1: Auflistung der Optikdesigndaten und der simulierten Werte. Die Parameter  $R_{1/2off}$  wurden beim asphärischen *Design 3* durch die konische Konstante  $KK$  ersetzt. Die Wellenfrontfehler beziehen sich auf den definierten Durchmesser von 10 mm. Die Angabe *gewichtet* bezieht sich auf den in Kapitel 5 definierten gewichteten mittleren Wellenfrontfehler aller Blickrichtungen. Aufgrund der Symmetrie entfällt das vertikale Prisma.

Modell	Einheit	<i>Design 1</i>	<i>Design 2</i>	<i>Design 3</i>
$R_1$		65	100	126,25
$R_2$		64,2	99,33	125,74
$R_{1off}$	[mm]	15	20	$\kappa_1 = 2$
$R_{2off}$		15,02	20,02	$\kappa_2 = 2,013$
$R_{12\_Z}$		1,5	1,5	0,9
<b>Dicke</b> (berechnet, $\alpha = 90^\circ$ )		2,3	2,17	1,41
<b>Dicke</b> (berechnet, $\alpha = 30^\circ$ )		1,52	1,39	1,31
<b>sphärische Wirkung</b>	[1/m]	0,014	0,008	0,000
<b>astigmatische Wirkung</b>	[1/m]	0,007	0,001	0,001
<b>hor. pris. Wirkungsdiff.</b>	[cm/m]	0,000	0,005	-0,032
<b>gerade</b>		0,073	0,046	0,000
<b>20° temporal</b>		0,052	0,019	0,163
<b>20° oben</b>	RMS	0,130	0,039	0,077
<b>20° nasal</b>	[ $\lambda$ ]	0,246	0,055	0,161
<b>20° unten</b>		0,130	0,039	0,077
<b>gewichtet</b>		0,122	0,040	0,087

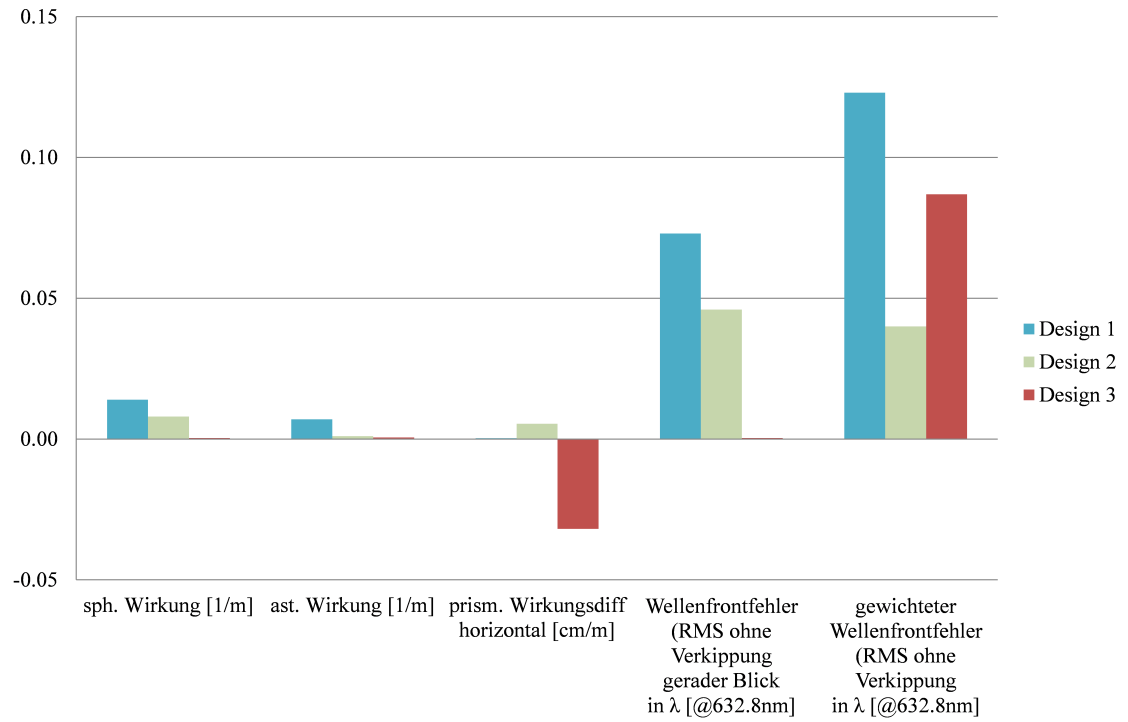


Abbildung 10.19: Simulation der optischen Kenngrößen der drei generierten neuen Optikdesigns. Dargestellt sind die sphärische und astigmatische Wirkung, die horizontale prismatische Wirkungsdifferenz, der Wellenfrontfehler des geraden Blickes und der gewichteter Wellenfrontfehler aller fünf Blickrichtungen.

## A4

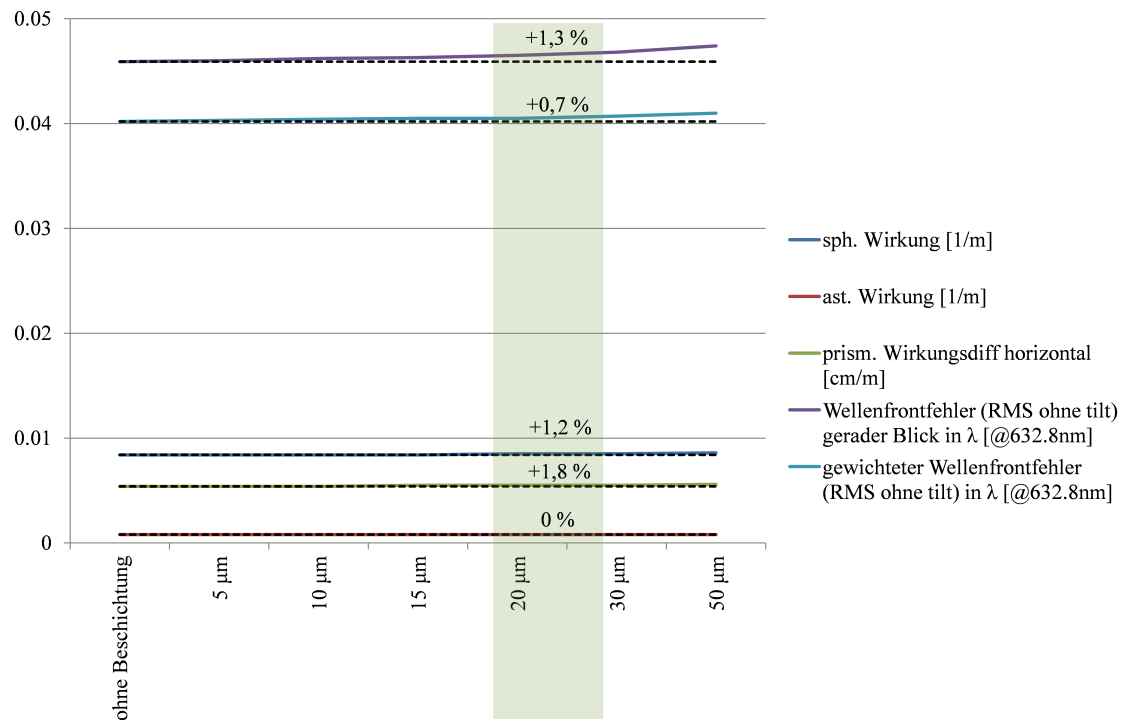


Abbildung 10.20: Änderung der optischen Eigenschaften der Schutzbrille *Design 2* bei unterschiedlichen Beschichtungsdicken auf der Rückseite der Brille. Brechungsindex der Beschichtung liegt bei  $n = 1,25$ . Die Dicke der Schicht ist konstant. Eine Schichtdicke von 20  $\mu\text{m}$  stellt den Normalfall dar und ist grün gekennzeichnet.

# 11 Eigene Publikationen

## Wissenschaftliche Originalarbeiten

- [1] Zelzer B, Speck A, Langenbucher A, Eppig T (2013) Theoretical model for design and analysis of protectional eyewear. *Z Med Phys* 23(2):120 – 128
- [2] Speck A, Zelzer B, Eppig T, Langenbucher A (2013) Experimental assessment of eye protection efficiency against high speed projectiles. *Z Med Phys* 23(1):71 – 76
- [3] Eppig T, Zoric K, Speck A, Zelzer B, Götzelmann J, Nagengast D, Langenbucher A (2012) Wavefront analysis of personal eye protection. *Opt Express* 20(16):17806 – 17815
- [4] Speck A, Zelzer B, Kannengießer M, Langenbucher A, Eppig T (2013) Inspection of freeform intraocular lens topography by phase measuring deflectometric methods. *Appl Optics. Appl Opt* 52(18):4279 – 4286

## Geplante Publikationen

- [1] Speck A, Zelzer B, Speich M, Börret R, Langenbucher A, Eppig T Deflectometric analysis of high volume injection molds for production of occupational eye wear. *Appl Opt*; im Revisionsprozess

## Kurzveröffentlichungen, Vorträge und Poster

- [1] Zelzer B, Speck A, Langenbacher A, Eppig T. Schutzbrillen mit optischer Premiumqualität. Poster P05.08, 3 Ländertagung der ÖGMP, DGMP und SGSMP, Wien, Österreich, 28.09. – 01.10.2011
- [2] Zelzer B, Speck A. Optimierung von Arbeitsschutzbrillen mit optischer Premiumqualität: Softwareplattform zur Simulation von Abbildungsfehlern. Arbeitskreis Ophthalmische Optik, Aalen, Deutschland, 08.10 – 09.10.2011
- [3] Zelzer B. Physikalische und medizinische Aspekte der Farbwahrnehmung. Refraktive Herbstakademie, Linz, Österreich, 17.11 – 18.11.2011
- [4] Speck A, Zelzer B, Langenbacher A, Eppig T. Deflectometry for surface inspection and shape fidelity analysis for manufacturing and polishing of safety spectacle molds. DGaO Proc 2012; 113: E-Abstract 30
- [5] Zelzer B. Laserklassen & Laserschutzbrillen und deren Einfluss auf die Farbwahrnehmung. Refraktive Herbstakademie, Linz, Österreich, 09.11 – 11.11.2012

## 12 Danksagung

Durch den stetigen Gedankenaustausch und die vielen konstruktiven Gespräche danke ich an dieser Stelle meinem Projektpartner Alexis Speck. Sie vermieden wahrscheinlich die ein oder andere Sackgasse und trugen zur optimalen Arbeitsumgebung während der Promotion entscheidend bei. In diesem Kontext auch vielen Dank an Melanie Gillner und Marc Kannengießer, auch wegen der fachlichen Unterstützung im Bereich Optik und Physik.

Für die fachlich sehr kompetente Betreuung und dem Beiseite stehen bei Problemen und Fragestellungen jeglicher Art danke ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Achim Langenbacher und meinem Betreuer Dr. Timo Eppig.

Zu guter Letzt danke ich Dr. Annette Walter, die mich dafür begeistert hat diesen Weg einzuschlagen.

Benedikt Zelzer

August 2013

